

A decorative blue floral border with intricate scrollwork and leaf patterns, framing the central text.

# **Faut-il avoir peur du nucléaire ?**

**Claude Allègre  
Dominique de Montvalon**

VISIT...

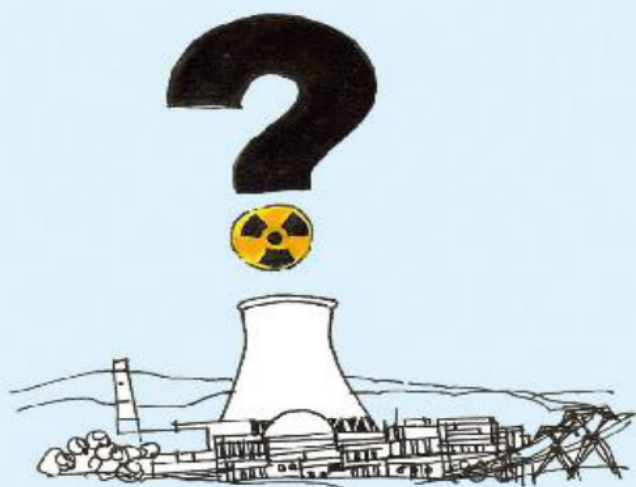
LANZAROTE  
*Caliente*.com

Claude Allègre

*de l'Académie des sciences*

avec Dominique de Montvalon

# Faut-il avoir peur du nucléaire



PLON

## DU MÊME AUTEUR

- L'Imposture climatique ou La Fausse Écologie*, Plon, 2010.
- La science est le défi du XXI<sup>e</sup> siècle*, Plon, 2009.
- La Géologie : passé, présent et avenir de la Terre*, Pour la science, 2009.
- Figures de proue*, Plon/Fayard, 2008.
- La Science et la vie*, Fayard, 2008.
- La Défaite en chantant* (conversations avec Dominique de Montvalon), Plon, 2007.
- Ma vérité sur la planète*, Plon, 2007.
- Un peu plus de science pour tout le monde*, Fayard, 2006.
- Vous avez dit matière grise ?*, Plon, 2006.
- Le Défi du monde*, avec Denis Jeambar, Fayard, 2006.
- Dictionnaire amoureux de la science*, Plon, 2005.
- Géologie isotopique*, Belin, 2005.
- Quand on sait tout, on ne prévoit rien*, Fayard, 2004.
- Un peu de science pour tout le monde*, Fayard, 2003.
- Galilée*, Plon, 2002.
- Changer de politique, changer la politique*, Éditions de l'Aube, 2002.
- Histoire de la Terre*, Fayard, 2001.
- Les Audaces de la vérité* (entretiens avec Laurent Joffrin), Robert Laffont, 2001.
- Vive l'école libre !*, Fayard, 2000.
- Toute vérité est bonne à dire*, avec Laurent Joffrin, Robert Laffont, 2000.
- Dieu face à la science*, Fayard, 1997.
- Questions de France*, Fayard, 1996.
- La Défaite de Platon*, Fayard 1995.
- L'Âge des savoirs*, Gallimard, 1993.
- Écologie des villes, écologie des champs*, Fayard, 1993.
- Introduction à une histoire naturelle*, Fayard, 1992.
- De la pierre à l'étoile*, Fayard, 1992.
- Économiser la planète*, Fayard, 1990.
- Douze clés pour la géologie* (entretiens avec Emile Noël), Belin, 1987.
- Les Fureurs de la Terre*, Odile Jacob, 1987.
- L'Écume de la Terre*, Fayard, 1983.
- Introduction à la géochimie* (en coll. avec G. Michard), PUF, 1973.

Claude Allègre

*avec*

*Dominique de Montvalon*

Faut-il avoir peur  
du nucléaire ?



PLON

[www.plon.fr](http://www.plon.fr)

© Plon, 2011

Couverture : © A. Bouldouyre

EAN : 978-2-259-21528-2

*Ce document numérique a été réalisé par [Nord Compo](#)*

Je voudrais dédier ce livre à Georges Charpak. Il fut mon ami. Il fut surtout un infatigable combattant pour la science et pour l'éducation de la science avec sa magnifique « main à la pâte ». Comme on le sait, il était spécialiste de physique nucléaire et des particules, mais il abordait ces problèmes avec la vision de l'humaniste qu'il était. Sans tabou, mais sans concessions.

Je veux aussi remercier ceux qui m'ont aidé à réaliser ce livre en un temps record : mes éditeurs Olivier Orban et Jean-Claude Simoën, mon fils Laurent qui m'a fait part de critiques pertinentes et fructueuses.

Puisse ce livre contribuer à combattre un peu le pire danger pour une civilisation : la peur irraisonnée.

# Chapitre 1

## Amalgames

**Dominique de Montvalon : Claude Allègre, la question que tout le monde se pose, aujourd'hui, est : faut-il avoir peur du nucléaire ?**

**Claude Allègre :** Bien sûr qu'il faut en avoir peur !...

Il faut avoir peur des milliers d'ogives à tête nucléaire qui sont pointées sur des centaines de grandes villes du monde – et peut-être certaines sur Paris.

Il faut avoir peur de ce plutonium 239 que l'on peut acheter au marché noir pour confectionner des bombes.

Il faut avoir peur de ces pays que nous qualifierons d'idéologiquement exaltés, l'Iran, la Corée du Nord, etc., et qui, l'un après l'autre, se dotent de l'arme nucléaire.

Il faut avoir peur de la folie des hommes qui, depuis des millénaires, se font la guerre et ont toujours utilisé pour cela les armes qu'ils possédaient sans s'inquiéter des victimes.

Pour tous ceux qui se soucient de la survie de l'homme sur notre planète – et je suis de ceux-là –, la menace nucléaire ne doit pas être oubliée, ne peut être oubliée. Mais il s'agit d'abord de la menace militaire.

**D. de M. :** Vous parlez du nucléaire militaire, et c'est évidemment capital. Mais qu'en est-il du nucléaire civil ? C'est cette question-là que les gens se posent après les événements qui viennent de se produire au Japon !

**C. A. :** J'y viens. Mais permettez-moi d'insister encore sur les dangers majeurs liés à l'activité militaire. La fabrication des bombes soviétiques et américaines a conduit à utiliser du plutonium 239. Les traités de limitation des armements nucléaires, sagement négociés par Mikhaïl Gorbatchev et Ronald Reagan à partir de l'historique rencontre de Reykjavik, ont prévu la destruction de la moitié des ogives nucléaires américaines et russes. On a donc récupéré dans cette entreprise des tonnes de plutonium très radioactif. Qu'en fait-on ? Où les stocke-t-on ? On apprend avec inquiétude que la mafia russe a réussi à en récupérer une partie importante, qu'elle vend aux plus offrants. Imaginez ces stocks entre les mains d'Al-Qaïda ou d'un Kadhafi



quelconque !

**D. de M. : Je vous interrogeais sur les centrales nucléaires. À mon tour d'insister. À vos yeux, elles constituent, elles aussi, un danger, non ?**

**C. A. :** Certaines centrales nucléaires sont en effet potentiellement dangereuses, notamment les centrales ex-soviétiques. Certes, après Tchernobyl, elles ont été un peu « bricolées » pour en améliorer la sécurité, mais elles restent préoccupantes. Et jusqu'ici les Russes et les anciens pays membres de l'URSS n'ont pas encore entrepris de remplacer toutes les centrales par des centrales modernes. Il y a donc là, je l'ai dit et je le confirme, un risque majeur.

**D. de M. : Qu'appellez-vous une centrale « moderne » (par opposition à une centrale « vétuste ») ? Nous, nous ne faisons pas le distinguo...**

**C. A. :** Les centrales modernes sont celles qui ont été conçues après les années 1965-1970, qui sont fondées sur la technologie dite de l'uranium enrichi – rassurez-vous, je dirai ce que signifie ce terme – et qui ont bien pris en compte l'essentiel des dangers. Pour simplifier, ce sont les centrales françaises, américaines, allemandes ou suédoises.

**D. de M. : Et les centrales japonaises ?**

**C. A. :** Je vous dirai pourquoi elles sont un peu moins sûres, mais elles sont aussi un peu moins chères. Néanmoins, elles ont toutes résisté au gigantesque tremblement de terre de magnitude 9 sur l'échelle de Richter. Ce qui a endommagé quelques centrales, c'est le tsunami créé par le séisme.

**D. de M. : Soyez franc, comme vous l'êtes toujours : avec les centrales françaises ou américaines, courons-nous un danger ?**

**C. A. :** Le danger qu'elles font courir au monde est beaucoup moins élevé que le risque militaire ou celui – très préoccupant – du marché clandestin des matières fissiles. Si j'ai tardé à répondre à votre question initiale, c'est parce que je tenais à hiérarchiser les menaces nucléaires. La menace n° 1 ? Le nucléaire militaire et les déchets, notamment ceux qui résultent de la fabrication des bombes. Le nucléaire civil ce n'est pas une menace, c'est un risque. C'est une distinction de langage fondamentale. Les avions ne sont pas une menace, mais lorsqu'on monte à bord, on prend un risque !

**D. de M. : Tout de même, le drame que vient de vivre le Japon n'a-t-**

## **il pas mis en évidence les dangers du nucléaire civil, et pas militaire ?**

**C. A. :** La situation japonaise a suscité un emballement médiatique qui a tourné au catastrophisme intégral, mettant en jeu le pire comportement intellectuel, à savoir l'amalgame.

**D. de M. :** Quel « amalgame » ? La tragédie, les Japonais l'ont vécue. Ils ne l'ont pas inventée...

**C. A. :** L'amalgame, c'est la confusion qui a été entretenue dans les esprits en mettant en parallèle des événements distincts. Le premier amalgame, c'est, bien sûr, Fukushima = Hiroshima. Même la consonance prête à la confusion ! Certes, personne n'a fait le parallèle directement. C'est plus subtil. En associant mots et images, on stimule l'archéo-cerveau.

**D. de M. :** Que voulez-vous dire ?

**C. A. :** Lorsqu'on montre des images de désolation, de maisons écroulées, de bateaux éventrés et qu'il est question, dans le commentaire, du nucléaire, d'explosion du « cœur », de nuages radioactifs, cela suffit pour faire remonter à la surface des consciences, même chez les plus jeunes, l'horreur des bombardements d'Hiroshima ou de Nagasaki. Or, il faut le dire et le répéter : une centrale nucléaire qui explose, cela n'a rien à voir avec une explosion nucléaire. Une centrale nucléaire ne peut pas se transformer en bombe nucléaire. Il faut un combustible beaucoup plus « enrichi » pour faire une bombe. Soyons direct, comme vous le souhaitez : même si la centrale de Fukushima avait explosé, cela n'aurait rien eu à voir avec Hiroshima !

**D. de M. :** Il y a quand même eu une tragédie au Japon !

**C. A. :** Oui, la tragédie, c'est d'abord un énorme tremblement de terre, qui a déclenché un tsunami ravageur, lequel a ravagé villes et villages et tué des milliers de personnes, et qui a endommagé des centrales nucléaires. Le goût du sensationnel n'autorise pas à massacrer la langue française ! Il faut savoir distinguer entre incident, accident, catastrophe et désastre. Je refuse de vivre sous la dictature du superlatif sémantique ! Au Japon, il y a eu des accidents de fonctionnement dans plusieurs centrales nucléaires, provoqués par un violent tsunami. Jusqu'ici, il n'y a pas eu une catastrophe nucléaire<sup>1</sup>. Laissez-moi vous donner deux mesures – complémentaires – de l'horreur. La combinaison séisme-tsunami aura tué sans doute plus de 30 000 personnes. À ce jour, l'accident nucléaire n'a contaminé, si l'on peut dire, « que » quelques dizaines de techniciens. Certes, c'est terrible pour eux, mais ce n'est pas comparable à Tchernobyl où des milliers de techniciens ont été irradiés par des doses mortelles. Sur le plan matériel, le séisme a fait des dégâts qu'on

peut estimer à plusieurs centaines de milliards d'euros. Or, pour reconstruire des centrales neuves avec la même puissance électrique, il faudra environ dix milliards. Là encore, il n'y a pas de comparaison possible entre les deux catastrophes. Mais ne me faites pas dire, comme certains de vos confrères l'ont fait, que je tiendrais le risque nucléaire pour négligeable. Au Japon, il était important, mais, heureusement, on a pu, semble-t-il, maîtriser à temps ce qui aurait pu devenir une véritable catastrophe.

#### **D. de M. : Une catastrophe comme celle de Tchernobyl ?**

**C. A. :** Voilà encore un amalgame rapide, mais cette fois moins critiquable. La centrale de Tchernobyl était une centrale vétuste, dont les mécanismes de sécurité étaient rustiques, et dénoncés comme dangereux depuis des années par les autorités internationales de sûreté nucléaire. De plus, il n'y avait aucune enceinte de confinement. Et la catastrophe est due à une série d'erreurs humaines inadmissibles. Les techniciens avaient volontairement mis le réacteur en régime surcritique. Juste pour voir comment il se comportait. Ensuite, ils avaient été dépassés par les événements. Cela dit, à Fukushima, une explosion du cœur et la fissuration des enceintes auraient pu libérer aussi un gros nuage radioactif. Pour les populations situées à proximité, cela peut être catastrophique. Jusqu'ici, à l'heure où j'écris ces lignes, on est toujours au niveau de l'accident grave. Le nuage radioactif n'est pas très actif et les fuites d'eau radioactive semblent bien identifiées. Mais soyons prudents. Attendons la fin. La compagnie japonaise Tepco porte une lourde responsabilité. À vouloir faire des économies sur la sécurité, à refuser au début l'aide de ceux qui savent (les Français et les Américains), ils n'ont fait qu'amplifier l'accident !

#### **D. de M. : Vous avez été très critique vis-à-vis des médias, très très critique même. N'ont-ils pas fait tout simplement leur travail d'information et d'alerte ?**

**C. A. :** J'ai été scandalisé. D'abord (là aussi il faut hiérarchiser) par l'attitude des écologistes qui ont immédiatement relancé le débat sur le nucléaire sans un mot de compassion pour le Japon et les Japonais. Nicolas Hulot, Cécile Duflot, Eva Joly ou Corinne Lepage se sont tous distingués par cette démarche politicienne sans un mot de compassion pour les victimes du désastre sismique ! Ensuite, parce que les médias, et en particulier les deux principales chaînes de télévision, ont parlé beaucoup plus de la catastrophe nucléaire que du désastre humanitaire créé par le tsunami. Dans un monde où l'on est submergé par des torrents d'information, la première qualité d'une chaîne est de trier cette information, et de la hiérarchiser. Je dirais, encore plus s'agissant d'une chaîne publique, c'est-à-dire, sauf erreur, une chaîne pour le citoyen. Or, l'information a été axée sur le danger nucléaire maximum

présenté par les centrales japonaises, et on en est rapidement venu, en glissant, à la question nucléaire en France. Cette situation n'a pourtant rien à voir avec celle du Japon. Nous n'avons ni séismes de magnitude 9 ni tsunamis. Nos centrales sont beaucoup plus modernes. Nos techniciens sont beaucoup plus compétents que les Japonais et le nucléaire en France est très contrôlé. En faisant ce parallèle, que veut-on ? Affaiblir l'un de nos fleurons industriels qui emploie directement et indirectement 200 000 personnes ? Veut-on amplifier la crise ? Veut-on augmenter le chômage ? Un peu de responsabilité et de rigueur des médias ne serait pas inutile. Les dégâts humains et matériels du tremblement de terre et du tsunami ont été traités secondairement. On a insisté sur la situation et le rapatriement des Français, ce qui n'a pas donné une image mirifique de la France. Beaucoup de Japonais en ont d'ailleurs été choqués. On a connu des France plus solidaires !

**D. de M. : On va dire que vous refusez le débat sur le nucléaire !**

**C. A. :** Nullement. Je dis seulement qu'il y a un temps pour tout. Il y a un temps pour la compassion et la solidarité. Il y a un temps pour l'évaluation scientifique de la situation. Puis viendra ensuite le temps des leçons à tirer et, si nécessaire, le temps du débat. Sans compter que cet affolement des médias a occulté pendant huit jours la Libye, laissant Kadhafi massacrer son peuple en toute impunité et contribuant à retarder la nécessaire intervention militaire. Et je ne parle pas de la Côte-d'Ivoire, ni d'Haïti où la situation reste tragique, avec l'hyper misère et l'instabilité politique. Ces pays-là sont passés aux oubliettes de l'information. Je peux comprendre les exigences de l'actualité, mais la disparition en France d'une jeune femme, aussi tragique qu'elle puisse être, doit-elle occuper, ce qui a été le cas, un temps d'antenne équivalent à la situation humanitaire au Japon, et laisser dans l'obscurité Haïti ? Les médias ont plus que jamais un pouvoir considérable : cela implique aussi de lourdes responsabilités.

**D. de M. : N'est-il pas inévitable que l'emballement qui suit une catastrophe « engloutisse », au moins passagèrement, toute l'information ?**

**C. A. :** N'oubliez jamais cela : les crises sont des révélateurs d'une situation ; à l'échelle personnelle comme à l'échelle d'une nation ou du monde, qu'il s'agisse de l'économie, de la politique ou, bien sûr, des médias. La manière dont le système médiatique a traité la catastrophe du Japon souligne les faiblesses fondamentales de ce système : goût du sensationnel, du tragique, suivisme, incapacité de recul et de sang-froid !

**D. de M. : Ne vous échappez pas, Claude Allègre ! Faut-il, oui ou non, avoir peur du nucléaire civil en France ?**

**C. A. :** Décomposons la réponse.

Si vous posez la question aujourd'hui, c'est que vous faites un lien avec l'accident nucléaire japonais ?

**D. de M. :** Bien sûr.

**C. A. :** Alors, la première réponse, c'est de souligner que la situation de la France n'a rien à voir avec celle du Japon. En rapprochant les deux, vous faites vous aussi un amalgame. La France est un pays à sismicité faible, et un tremblement de terre de magnitude 9 ou même 8 est impossible. Si les centrales japonaises de conception plus rustique que les françaises ont résisté au séisme, cela doit nous rassurer sur la situation française. Quant au tsunami qui est la véritable cause de l'accident nucléaire, et plus encore du désastre humanitaire, il y a très peu de risques pour nos côtes d'en accueillir un. Les annales historiques n'ont aucune trace d'un tel phénomène. Cela étant bien précisé, je ne vais pas vous répondre, comme ont pu le faire les « experts » et les responsables des années 1960-1970, et vous dire : « Rien à craindre ! Circulez, il n'y a rien à voir ! » Je ne suis pas un adepte du vieil adage militaire : « Chercher à comprendre, c'est déjà commencer à désobéir. » Ce livre se veut une opération citoyenne. Je veux expliquer pourquoi l'électricité produite par le nucléaire est une bonne solution. À condition d'être très rigoureux dans le contrôle de la sécurité, de progresser dans la gestion des déchets et de faire évoluer la technologie. Ce n'est pas un problème simple. Il faut le situer dans un contexte scientifique, bien sûr, mais aussi économique, psychosociologique et politique.

**D. de M. :** Êtes-vous partisan sur un tel sujet d'un référendum pour que, le jour venu, tous les citoyens aient voix au chapitre ?

**C. A. :** Pas plus que je ne suis partisan de faire voter les gens sur la véracité d'un théorème de mathématiques !... La démocratie n'a jamais remplacé la connaissance et le savoir. Prétendre le contraire, c'est de la démagogie. C'est ce que veulent beaucoup d'écologistes, c'est utiliser la peur pour faire prendre – à chaud, dans l'émotion – une décision politique essentielle. Encore une fois, j'insiste : ce livre est destiné à informer le public aussi objectivement que possible, de manière à bien poser le problème, donc à permettre à chacun de se faire une opinion fondée sur la raison. Mon attitude n'est pas celle d'un expert, mais du pédagogue que j'ai été toute ma vie. Je cherche à faire partager mon savoir au plus grand nombre, de manière à rendre le débat plus transparent, donc plus démocratique.

Nous allons nous y efforcer sans parti pris et sans occulter quoi que ce soit !

<sup>1</sup>- Je ne préjuge pas de l'avenir mais à l'heure où j'écris ces lignes, le 30 mars 2011, ce n'est encore qu'un très grave accident.

## **Chapitre 2**

# **Rayonnements, particules et noyaux atomiques**

**C. A. :** On ne peut ni comprendre ni encore moins juger ou même se faire une simple opinion sur le nucléaire si l'on ne sait rien, si l'on ne sait pas d'où il vient, si l'on n'en connaît pas les péripéties et l'histoire. Car dans ce domaine, plus peut-être que dans d'autres domaines scientifiques, l'histoire pèse, et pèse lourd, sur les mentalités. Que ce soit sur le conscient ou peut-être plus encore sur l'inconscient. Il faut donc apprendre un minimum de physique nucléaire<sup>1</sup> !

**D. de M. :** **Comment a-t-on découvert cette énergie nucléaire à bien des égards si formidable et, aujourd'hui, si inquiétante ? Une énergie qui, disons-le clairement, permet le meilleur et le pire ?**

**C. A. :** Le berceau de l'énergie nucléaire, c'est la France, plus précisément le 5<sup>e</sup> arrondissement de Paris. L'aventure débute à l'extrême fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Dans un appartement du Jardin des Plantes, jouxtant la rue Cuvier, où se trouve le laboratoire de physique du Muséum d'histoire naturelle. Le professeur qui y officie est Henri Becquerel, polytechnicien, descendant d'une lignée de physiciens célèbres. Il est professeur au Muséum où il a succédé à son père.

**D. de M. :** **Que fait Henri Becquerel ?**

**C. A. :** Nous sommes en 1896 et il fait des expériences pour tenter de découvrir la nature de ces mystérieux rayons – on les appelle X puisqu'ils sont de nature inconnue – que vient de découvrir le physicien allemand Roentgen. Là, il découvre qu'un minerai d'uranium peut lui aussi émettre des sortes de rayons X qu'il appelle rayons uranyle. C'est le début de la saga de la radioactivité. C'est l'aventure d'une poignée de pionniers courageux qui, face au scepticisme de la majorité des scientifiques, vont bousculer la science.

Les expériences de Becquerel sont à l'origine de toute la physique moderne et aussi, par conséquent, de l'énergie nucléaire militaire et pacifique.

**D. de M. : Mais on ne parle jamais de Becquerel. On parle toujours de Pierre et Marie Curie. Ce sont eux qui ont été enterrés au Panthéon.**

**C. A. :** Oui, et, sous cet angle, c'est une injustice. Mais le rôle de ce couple mythique va être lui aussi décisif pour la suite de l'histoire. En 1891, arrive à Paris une jeune Polonaise qui veut suivre des études en sciences physiques et en mathématiques à la faculté des sciences. Elle s'appelle Marie Sklodowska. En 1894, elle rencontre Pierre Curie, qu'elle épouse l'année suivante. Le conte de fées commence. Pierre Curie est professeur à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris, une école prestigieuse qui existe toujours, rue Vauquelin. En cette année 1897, il lui propose de travailler sur cette énigme que constituent la nature et l'origine de ces rayons uraniques découverts par Henri Becquerel.

**D. de M. : Et elle dit oui !**

**C. A. :** Elle accepte même avec enthousiasme. Becquerel accueille cette idée favorablement et, avec une grande générosité, décide de coopérer pleinement avec les Curie. Ensemble, ils vont lever petit à petit le voile sur ce phénomène mystérieux que Marie Curie appelle radioactivité (activité qui émet des rayons).

L'aventure de ce trio est d'abord une légende racontée maintes fois. Avec des épisodes violents et polémiques – je pense à ceux mettant en cause les Anglais qui les traitent d'escrocs et de faussaires parce que l'uranium purifié est moins actif que l'uranium dilué dans les roches.

C'est pour contrer cette critique qu'il vont entamer un épisode épique – traiter des tonnes de minerai d'uranium par des acides corrosifs, dans d'immenses marmites, dans un garage de la rue Vauquelin, au risque d'ailleurs d'y laisser leur vie<sup>2</sup>. Tout cela pour démontrer l'intuition de Marie Curie, suivant laquelle l'uranium n'est pas le seul produit radioactif de la roche. Ce sera la découverte du polonium (dédié à la patrie de Marie, la Pologne) et du célèbre radium. L'un est l'autre sont radioactifs, ils sont des descendants de l'uranium. Ils sont les membres d'une chaîne où les produits se désintègrent les uns dans les autres. Marie Curie avait raison ! Premier triomphe. Le mystère est éclairci. Les Anglais déboutés.

Au trio français va alors se joindre un jeune physicien néo-zélandais, Ernest Rutherford. Au Canada d'abord, en collaboration avec le chimiste Soddy en Angleterre ensuite, son travail va admirablement compléter celui du trio français. Le conte de fées va petit à petit se transformer en triomphe. Leurs mérites enfin reconnus, ils reçoivent tous les quatre en 1903 le prix Nobel. De physique pour les Français, de chimie pour Rutherford.

Mais en 1906 le drame vient briser cette aventure. Pierre Curie est renversé mortellement par une voiture à cheval rue Dauphine. Deux ans plus



tard, Henri Becquerel meurt lui aussi, Marie reste seule pour porter le flambeau. Elle s'en acquittera fort bien puisqu'un second prix Nobel, de chimie<sup>3</sup> cette fois, la récompensera plus tard pour la découverte du radium.

**D. de M. : C'est en effet une véritable saga.**

**C. A. :** Mais ce qu'il faut bien apprécier, c'est que cette saga franco-anglaise va être à l'origine de toutes les découvertes futures qui vont fonder la physique moderne. La découverte de la structure de l'atome avec le noyau au centre, les électrons tournant autour (on a cru à tort pendant un temps que c'était un mini système solaire). Puis la structure du noyau lui-même composé de neutrons (électriquement neutres) et de protons (chargés positivement). Puis, ensuite, la démonstration qu'on pouvait casser les noyaux et produire ainsi des quantités colossales d'énergie. Tout part de la découverte de la radioactivité !

**D. de M. : Mais qu'est-ce que c'est exactement, la radioactivité ?**

**C. A. :** C'est la transformation spontanée d'un atome en un autre atome. Un élément chimique se transforme en un autre élément chimique. Ce faisant, en se désintégrant, il émet des rayonnements et produit de la chaleur. Ce qui est extraordinaire, c'est que cette transmutation appartient à l'atome et ne dépend que de l'atome. Elle ne dépend ni de la forme chimique, ni de la température, ni de la pression ! Une masse, formée d'atomes radioactifs, se détruit, à son rythme. Rien ne peut modifier le processus d'autodestruction, ni le ralentir ni l'accélérer. Rien ne peut donc modifier la production de chaleur ni l'émission de rayonnements ! Ce n'est que l'un des phénomènes découverts par les physiciens et les chimistes du début du XX<sup>e</sup> siècle, mais c'est l'un des plus spectaculaires.

**D. de M. : Qui sont les auteurs, les pionniers de toutes ces découvertes extraordinaires ?**

**C. A. :** La structure de l'atome, c'est Rutherford, associé à un jeune physicien danois, Niels Bohr. La structure du noyau, toujours Rutherford. La démonstration qu'on peut casser le noyau en le bombardant par des particules, Rutherford encore.

**D. de M. : Mais pourquoi ne parle-t-on jamais de Rutherford ?**

**C. A. :** On en parle beaucoup chez les physiciens, car c'était un expérimentateur de génie qui a fondé toute une école prestigieuse à Cambridge. Mais le grand public préfère parler des théoriciens qui, parallèlement, ont développé les concepts qui ont permis d'expliquer et de

relier toutes ces découvertes.

**D. de M. : Et qui étaient ces théoriciens<sup>4</sup> ?**

**C. A. :** Ils s'appelaient Louis de Broglie (un Français), Erwin Schrödinger (un Autrichien), Werner Heisenberg (un Allemand), Paul Dirac (un Anglais), et, au-dessus de tous, Albert Einstein. Les deux théories de base s'appellent : la relativité et la mécanique quantique. Le jeune Albert Einstein, ex-étudiant moyen de l'École polytechnique de Zurich, petit employé du bureau des brevets de Berne, a été à l'origine de ces deux théories. La première, qu'il a entièrement développée. La seconde, qu'il a initiée (et il reçut pour cela le prix Nobel de physique), puis répudiée<sup>5</sup>.

**D. de M. : Ce qui nous importe ici, Claude Allègre, c'est surtout la théorie de la relativité... N'est-ce pas ?**

**C. A. :** Oui. Einstein a établi que la masse et l'énergie étaient des grandeurs physiques qui pouvaient se transformer l'une dans l'autre. Les réactions chimiques ne font varier la masse que de très peu, donc elles mettent en jeu une énergie limitée. Les réactions nucléaires, au contraire, font disparaître de la masse de manière substantielle, d'où les énormes quantités d'énergie mises en jeu. Ainsi, la production d'électricité nucléaire en France pendant un an fait disparaître 58 kilos de matière. Volatilisée, transformée en chaleur, utilisée ou gaspillée par les hommes.

**D. de M. : Est-ce la fameuse et historique formule  $E = mc^2$  ?**

**C. A. :** Exactement. E est l'énergie, m est la masse qui disparaît, et c la vitesse de la lumière qu'on doit multiplier par elle-même (élever au carré) pour obtenir le résultat.

**D. de M. : Cette énergie, comment se manifeste-t-elle ?**

**C. A. :** Sous forme de chaleur et de rayonnements.

La chaleur, c'est ce qu'on va chercher à utiliser, les rayonnements, c'est ce qui va nous créer des problèmes !

**D. de M. : Pour le profane que je suis, pouvez-vous nous résumer un peu les notions essentielles. On parle protons, neutrons, électrons... et on s'y perd.**

**C. A. :** La matière est faite d'atomes.

Cette simple affirmation, que tout le monde accepte aujourd'hui, a mis deux millénaires et demi à émerger. En ce début du XX<sup>e</sup> siècle où Becquerel

et les Curie découvraient la radioactivité, le plus grand chimiste de l'époque, Marcellin Berthelot, président de l'Académie des sciences, ancien ministre de l'Éducation nationale, ne croyait pas aux atomes !

Ces atomes sont différents suivant les éléments chimiques, mais ils ont tous une structure identique.

Au centre, un noyau, minuscule, très lourd, portant une charge électrique positive ; autour, et qui virevolte autour de lui, un nuage de très petites particules légères chargées négativement : les électrons.

Ce noyau, bien que minuscule, porte toute la masse de l'atome. C'est lui l'élément essentiel.

Les lois qui régissent le comportement des atomes, des électrons, du noyau, obéissent à la théorie de la mécanique quantique.

Pour modifier un élément chimique et le transformer en un autre élément chimique, une seule solution, modifier son noyau, donc, sa masse, donc, sa charge – les électrons s'arrangeront pour rendre électriquement neutre le tout !

**D. de M. : Mais modifier les atomes, n'était-ce pas le rêve des alchimistes qui rêvaient de transformer le plomb en or ?**

**C. A. :** Si, bien sûr, et parmi les alchimistes modernes il y avait Isaac Newton, « le savant absolu » ! Mais ils n'avaient aucune chance de réussir.

**D. de M. : Pourquoi ?**

**C. A. :** Parce que, pour modifier l'atome, il faut modifier le noyau, et cela demande des énergies considérables.

L'énergie emmagasinée dans les noyaux atomiques est énorme. Rien à voir avec celle que peut dégager la combustion ordinaire d'une substance, comme, disons... le pétrole ! Et c'est cette énergie énorme qui intéresse les hommes. C'est pourquoi ils ont cherché à « bricoler » les noyaux atomiques !

Pour modifier le noyau atomique, il faut réaliser ce qu'on appelle une réaction nucléaire (réaction entre noyaux), appelée ainsi par analogie avec une réaction chimique.

**D. de M. : Et comment réalise-t-on une réaction nucléaire ?**

**C. A. :** Le noyau a lui-même une structure interne. Il se compose de deux particules : le proton et le neutron. Le proton est chargé positivement (c'est lui qui charge le noyau), le neutron est neutre. Il n'est pas chargé. Il peut donc s'approcher du noyau des atomes sans être repoussé par leurs charges électriques. Et si cette approche se fait en lançant le neutron à une vitesse convenable, il va faire éclater le noyau, le casser en morceaux et finalement le transformer en un ou deux noyaux. Les réactions à l'aide de neutrons sont les réactions nucléaires les plus faciles à réaliser ! Car le neutron, sans charge

électrique, peut s'approcher du noyau sans être repoussé. Ça tombe bien, ce sont celles-là qui nous intéressent<sup>6</sup>.

**D. de M. : Donc, on bombarde un atome par un neutron, le neutron se fraye un chemin vers le noyau, et là, d'un coup d'un seul, il fait exploser le noyau et le casse en morceaux. Ai-je bien compris ?**

**C. A. :** Oui, assez bien.

Mais ces réactions nucléaires sont des phénomènes extraordinaires par l'ampleur de l'énergie mise en jeu. Une réaction nucléaire une fois amorcée – et c'est difficile de l'amorcer – libère des quantités d'énergie énorme, elle fabrique de nouveaux atomes, mais libère aussi des rayonnements et des particules expulsés lors de l'éclatement du noyau.

Les rayonnements sont des rayons X très durs, les particules sont des neutrons, des protons ou des électrons.

**D. de M. : Ce sont ces rayonnements et ces jets de particules nucléaires qui sont dangereux !**

**C. A. :** Les rayonnements et les flux de particules émis lors des réactions nucléaires pénètrent la matière. Au cours de ce trajet, ils perdent leur énergie en interagissant avec les atomes de la matière et finissent par s'y perdre ! Du coup, on utilise la matière pour arrêter les rayonnements et se protéger de leurs effets.

Ainsi, par exemple, pour se protéger contre les rayonnements et les particules, on réalise les expériences en se mettant à l'abri derrière des murs de plomb.

**D. de M. : Pourquoi le plomb ?**

**C. A. :** Parce qu'il absorbe bien les rayonnements et les particules.

Pour protéger les individus, on leur confectionne des habits avec des matériaux dans lesquels on a incorporé du plomb.

**D. de M. : Mais la radioactivité émet elle aussi des rayonnements et des particules ?**

**C. A. :** Bien sûr, parce que la radioactivité, c'est une réaction nucléaire spontanée. C'est une transformation radioactive dont l'origine se situe dans le noyau de l'atome.

Les désintégrations radioactives émettent également des rayonnements et des particules, et l'on s'en protège aussi en enfermant les produits radioactifs dans des containers en plomb.

**D. de M. : Mais les rayonnements agissent aussi sur la matière vivante ?**

**C. A. :** Bien sûr. Ils agissent sur la matière vivante en détruisant des molécules, ou même des cellules. On sait par exemple que lorsqu'ils détruisent des molécules d'ADN ils peuvent provoquer des modifications génétiques.

L'Américain Müller a même obtenu avant la guerre des mutations sur la mouche drosophile par des irradiations de rayons X. D'un autre côté, la destruction des cellules par les rayonnements peut conduire à induire des cancers ou, à l'inverse, peut être utilisée pour détruire des cellules cancéreuses.

On n'a réalisé que ces rayonnements pouvaient être dangereux pour l'homme que petit à petit.

Au début des travaux sur la radioactivité, on pensait même que les irradiations étaient des phénomènes bénéfiques.

**D. de M. : « Bénéfiques » ? Comment cela ?**

**C. A. :** On a su très vite que la radioactivité avait des effets sur la peau. En 1901, Henri Becquerel et Pierre Curie présentaient ensemble une communication à l'Académie des sciences sur l'effet du radium sur la peau. Ils avaient l'un et l'autre oublié une pastille de radium dans leur poche et l'avait gardée ainsi pendant plusieurs jours. Ils avaient constaté l'existence d'une tache rouge sur la peau proche du radium. Pourtant, cette observation n'inquiéta personne. Et pendant vingt ans, on va utiliser le radium pour soigner. Marie Curie l'utilisera pendant la guerre de 1914 pour soigner les blessés et, jusqu'en 1920, on l'utilisera systématiquement dans les crèmes de beauté. Ce n'est qu'en 1924 qu'on établira que l'exposition excessive au radium provoque, au contraire, des cancers ! Preuve que ces pionniers de la radioactivité étaient inconscients des dangers des rayonnements. Excepté Rutherford, ils sont tous morts d'un cancer dont l'origine n'est pas douteuse. Marie Curie, Irène sa fille (leucémie), Frédéric Joliot (cancer du foie) son gendre, et de nombreux scientifiques sont morts ainsi.

**D. de M. : Depuis, on a cerné le danger !**

**C. A. :** Oui, bien sûr, et on a défini des unités de mesure non seulement de l'activité radioactive, mais des effets de cette activité sur le corps humain. L'unité de radioactivité est le becquerel (Bq – une désintégration par seconde). L'unité d'action biologique, c'est le sievert (Sv). Retenons simplement, à ce stade, que les rayonnements peuvent être dangereux, mais seulement à partir d'une certaine dose d'un certain seuil, et qu'ils sont inoffensifs en deçà. Ce dernier point ne doit pas être oublié.

La meilleure preuve que ce n'est qu'à partir d'une certaine dose que vient le danger c'est que l'on soigne effectivement des cancers avec des expositions modestes au radium (c'est pourquoi l'Institut du radium a aussi un hôpital) et que l'on utilise l'absorption de substances radioactives pour réaliser certaines imageries médicales<sup>7</sup>.

C'est vrai aussi que, en permanence, nous recevons des irradiations naturelles substantielles venant de l'espace ou des roches.

Les effets des radiations sur le corps humain dépendent de l'intensité d'irradiation et du temps pendant lequel on est irradié. Nous reparlerons de tout cela en détail.

**D. de M. : De quoi parlez-vous ? De quel temps ? De quelle intensité ?**

**C. A. :** Excusez-moi. Il y a tellement de notions nouvelles dans ces découvertes sur la radioactivité que j'ai tendance à aller un peu vite. Revenons en arrière, vers 1902. Lorsqu'on découvre le phénomène radioactif au cours duquel un atome se transforme spontanément en un autre atome, Pierre Curie et Ernest Rutherford, indépendamment l'un de l'autre, font l'hypothèse que le processus ne dépend que de la nature de l'élément radioactif et du temps. Autrement dit : pour un type d'élément radioactif donné, une fraction de ses noyaux se désintègre dans chaque unité de temps. On peut dire autrement que, à chaque instant, il y a une probabilité donnée pour qu'un noyau se désintègre. Aucun phénomène extérieur – ni la température, ni la pression, ni la chimie – ne peut l'influencer. Mais, bien sûr, cette probabilité n'est pas la même pour tous les éléments radioactifs. Certains ont une probabilité de désintégration élevée. Donc, ils se détruisent très vite jusqu'à totalement disparaître. D'autres ont une probabilité de désintégration beaucoup plus faible, et donc une durée de vie plus longue. Pour caractériser chaque élément chimique radioactif, on a considéré le temps qu'il met pour désintégrer la moitié de ses atomes. On appelle cela la « période » de désintégration. Certains éléments radioactifs ont des périodes de l'ordre de la seconde (ils sont détruits très rapidement). D'autres ont des périodes de la journée, du mois, de l'année, du millier ou du milliard d'années.

**D. de M. : C'est extraordinaire !**

**C. A. :** Ce qui est extraordinaire, c'est que la loi établie par Pierre Curie et Ernest Rutherford est la même dans tous les cas et très robuste<sup>8</sup>. Chaque élément radioactif se transforme suivant sa propre loi, rien que sa propre loi. C'est ainsi que par exemple nous utilisons les éléments radioactifs pour dater les roches ou pour dater l'origine de la Terre à 4,55 milliards d'années.

Mais, bien sûr, chaque fois qu'un élément radioactif se désintègre, il émet des rayonnements, et ces rayonnements ont une action sur la matière

inerte en même temps que sur la matière vivante !

**D. de M. : J'apprends avec vous des choses que j'ignorais !**

**C. A. :** Encore un effort, je vais introduire une autre notion importante, celle d'isotopes.

**D. de M. : Qu'est-ce encore ce nom que je ne connais pas !**

**C. A. :** Vous avez entendu parler de l'uranium enrichi ?

**D. de M. : Oui, bien sûr, on ne parle que de ça ! Au fait, enrichi en quoi ?**

**C. A. :** Enrichi en uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ).

Alors que l'uranium naturel est de l'uranium 238.

Donc nous faisons suivre le mot uranium d'un chiffre. Qu'indique ce chiffre ? Il indique la masse. Il y a ainsi deux uraniums de masses différentes.

Ces différences de masse s'expliquent parce que, dans le noyau de l'uranium 238, il y a 3 neutrons de plus que dans le noyau de l'uranium 235. On dit que le  $^{238}\text{U}$  et le  $^{235}\text{U}$  sont les deux isotopes de l'élément uranium.

Les isotopes d'un même élément chimique diffèrent par leur nombre de neutrons, donc par leur masse. Mais au point de vue chimique, ils ont les mêmes propriétés. Ils forment les mêmes composés. Ils réagissent de manière semblable. Ils diffèrent seulement par leurs propriétés nucléaires, et donc ils réagissent différemment aux événements nucléaires. Les isotopes sont de nature variée suivant les éléments.

Ainsi, un même élément peut avoir un (ou plusieurs) isotope(s) stable(s) et un (ou plusieurs) isotope(s) radioactif(s). Certains isotopes sont naturels, d'autres sont artificiels, fabriqués lors d'une réaction nucléaire.

L'iode a un isotope stable de masse 127 et un isotope radioactif de masse 129, un autre très actif de masse 131.

Nous verrons que la double propriété, identité de comportement chimique-différence de comportement nucléaire, est un diptyque essentiel.

**D. de M. : Je suis intrigué.**

**C. A. :** Et nous voici au dernier épisode de notre saga : la découverte de la fission nucléaire. Cet épisode se situe juste avant la Seconde Guerre mondiale. Les acteurs s'appellent Enrico Fermi en Italie, Otto Hahn (un ancien élève de Rutherford) et Strassmann en Allemagne, Lise Meitner et Otto Frisch, Juifs réfugiés en Suède, fuyant le nazisme, mais anciens collaborateurs de Hahn, et Frédéric et Irène Joliot en France.

La découverte de la fission nucléaire a été attribuée aux Allemands Hahn

et Strassmann le 22 décembre 1938. C'est la version officielle. L'histoire est un peu plus compliquée. D'autres équipes, avant Hahn et Strassmann, avaient réalisé des expériences de fission nucléaire, notamment celle d'Enrico Fermi à Rome et peut-être celle de Frédéric Joliot en France, mais ils n'avaient pas su les interpréter. Le plus étonnant (est-ce le mot ?), c'est que Hahn et Strassmann n'avaient initialement rien compris non plus à leur expérience. Mais ils ont eu l'idée d'écrire à leur ancienne collaboratrice, Lise Meitner, réfugiée en Suède, pour leur décrire l'expérience qu'ils avaient du mal à interpréter.

C'est elle et son neveu Otto Frisch qui vont interpréter correctement les expériences de Hahn et Strassmann, et Otto Frisch fera l'expérience décisive. Ils avaient, semble-t-il, repris une idée, émise en 1935 par une chimiste, Ida Noddack, pour interpréter les expériences du groupe de Fermi<sup>9</sup> à Rome. Les expériences de Hahn et Strassmann vont être immédiatement reproduites par Frédéric Joliot et son équipe à Paris. La France n'a jamais quitté les avant-postes dans ces recherches de physique nucléaire.

#### **D. de M. : Mais qu'est-ce, au juste, la fission nucléaire ?**

**C. A. :** Je brûle encore les étapes et m'en excuse. Lorsqu'on bombarde habilement des noyaux d'uranium avec des neutrons, le noyau de l'isotope 235 se casse en deux morceaux de masse inégale et, dans le même élan, émet diverses particules dont des neutrons. À leur tour, ces neutrons vont casser des atomes d'uranium 235 situés dans le voisinage. Et ainsi, de proche en proche, la réaction va se propager et s'amplifier comme une réaction en chaîne explosive.

Naturellement, chaque événement dégage de la chaleur ; cette chaleur est due à l'annihilation de la masse, et donc, au total, on va produire ainsi une énorme quantité de chaleur. L'agent de liaison, c'est le neutron. Il produit la fission et il est produit par la fission. Cela, encore une fois, grâce à sa neutralité électrique qui lui permet de s'approcher des noyaux sans être repoussé par la charge électrique des protons. Le neutron, c'est la particule magique pour le physicien nucléaire !

Dès la découverte de ce phénomène, les physiciens<sup>10</sup> réalisent qu'ils ont entre leurs mains un phénomène extraordinaire, mais qui, comme le couteau, peut être utilisé pour le meilleur et pour le pire.

#### **D. de M. : Le pire, c'est la bombe, c'est Hiroshima !**

**C. A. :** Oui, c'est la bombe, mais ce n'est pas la première idée qu'ont eue les physiciens. Ils ont cherché d'abord à domestiquer cette énergie pour produire de la chaleur de manière contrôlée, et, par là, à produire de l'électricité.

L'idée de la bombe n'a mobilisé les scientifiques qu'après l'attaque des



Japonais à Pearl Harbor et les invasions nazies en Europe. C'est à ce moment, en 1941, qu'ils ont proposé aux responsables politiques, Churchill puis Roosevelt, de fabriquer une bombe atomique.

### **D. de M. : C'est la fameuse lettre d'Einstein à Roosevelt qui a tout déclenché ?**

**C. A. :** Oui, ça c'est la légende. Comme l'a très bien expliqué François de Closets dans son livre<sup>11</sup>, cette lettre de 1939 n'eut que peu d'effet pratique. Les généraux américains l'ont vite enterrée comme étant fantaisiste. C'est l'Anglais James Chadwick, l'homme qui avait découvert le neutron, qui a convaincu Churchill en 1941 d'essayer de fabriquer une bombe atomique. Ce dernier va convaincre Roosevelt de lancer l'Amérique dans l'aventure, et l'Angleterre se joindra à elle<sup>12</sup>.

Mais la première utilisation de la fission a été pacifique. La première pile nucléaire a été construite par Enrico Fermi à Chicago en 1942<sup>13</sup>.

La date officielle du début de ce qui va s'appeler le projet Manhattan est septembre 1942. Ce n'est qu'en mars 1943 qu'on regroupa dans une base secrète du Nouveau-Mexique la fine fleur des physiciens américains (c'est-à-dire, pour la plupart, des Européens ayant fui les nazis !), plus quelques invités européens. Cette équipe fut placée sous l'autorité du futur général Groves, pour l'heure directeur militaire du projet, et de Robert Oppenheimer.

Ils ont conçu et construit deux types de bombes, l'une à uranium 235 très enrichi (plus de 20 % je crois), l'autre au plutonium 239.

La préparation des combustibles à uranium enrichi en 235 était réalisée à Oak Ridge, dans le Tennessee, et le plutonium dans un réacteur construit à cet effet à Hanford, dans l'État de Washington.

Les bombes, respectivement à uranium et à plutonium, ont été larguées sur Hiroshima et Nagasaki les 6 et 9 août 1945.

Je donne toutes ces dates pour des raisons historiques, mais aussi pour montrer que les Américains ont été capables de fabriquer en deux ans deux bombes différentes à partir de rien, d'aucune expérience. Alors, lorsqu'on nous parle de quinze ans pour construire des centrales de quatrième ou cinquième génération, j'ai du mal à l'accepter !

Ces explosions ont tué au total près de 400 000 personnes<sup>14</sup> (certaines mortes plusieurs années après des suites de cancers provoqués par les doses d'irradiation excessives), ont provoqué un choc psychologique immense dans le monde entier et un sentiment de culpabilité, y compris chez les physiciens qui en avaient été les acteurs. Ces bombes ont tout à la fois mis fin à une guerre terrible et assuré la victoire du monde libre, et certains considèrent que c'est pour cela que, depuis soixante ans, on n'a pas eu de guerre mondiale (c'est le prétendu équilibre de la terreur). Mais il ne faut jamais oublier que ce fut un effroyable massacre. Était-ce bien ou mal ? Je ne me prononce pas, mais cette dualité de sentiments est désormais dans toutes les têtes. Et cette

assimilation militaire-civil pèse très lourd dans le débat sur le nucléaire.

Ce qui est troublant, c'est que, d'une certaine manière, ce dilemme s'est déporté sous une autre forme dans le domaine du nucléaire civil. Certes, chacun reconnaît l'efficacité énergétique de l'atome, mais certains s'interrogent : n'est-ce pas dangereux ? Faut-il accepter le danger pour le bien-être ?

Tous ces événements sont lointains, mais à mon avis ce sont des éléments essentiels du débat d'aujourd'hui. Alors que l'on parle de centrale nucléaire, de production d'électricité, en filigrane, il y a toujours le spectre d'Hiroshima et de Nagasaki, et lorsque un accident nucléaire se produit au Japon, l'image remonte automatiquement à la surface. Fukushima, Hiroshima, ces noms sonnent de manière si voisine ! D'où l'émotion actuelle. Mais doit-on céder à l'émotion ?

1- Je recommande quelques livres excellents : R. Bimbot, *Histoire de la radioactivité, l'évolution d'un concept et de ses applications*, Vuibert/Adapt, 2006 ; É. Segrè, *Les Physiciens modernes et leurs découvertes : des rayons X aux quarks*, Fayard, 1984 ; G. Charpak et R. L. Garwin, *Feux follets et champignons nucléaires*, Odile Jacob, 2000.

2- Voir le film *Les Palmes de monsieur Schutz*, de Claude Pinoteau, en 1997, tiré de la pièce de théâtre de Jean-Noël Fenwick.

3- En 1911. Voir les quelques livres indiqués en bibliographie.

4- Voir le livre d'Emilio Segrè, *Les Physiciens modernes et leurs découvertes*, Fayard, 1984.

5- Avec le fameux « Dieu ne joue pas aux dés », manière de refuser le caractère probabiliste de la mécanique quantique. Et Niels Bohr de répondre : « Qu'en savez-vous ? »

6- En fait, Rutherford a réalisé ses expériences fondamentales sur la découverte du noyau puis des réactions nucléaires à l'aide des rayons X, c'est-à-dire des noyaux d'hélium ionisé.

7- Ce qu'on appelle l'imagerie par positron et la scintigraphie.

8- Lorsque cette loi a été proposée, il y avait encore peu de cas de radioactivité mesurés et bien étudiés. Depuis, on a découvert des milliers de substances radioactives (en général artificielles). Quelle que soit leur période de désintégration, elles obéissent toutes à cette loi.

9- Emilio Segrè, *Les Physiciens modernes et leurs découvertes*, op. cit.

10- Enrico Fermi, alors émigré aux États-Unis, James Chadwick, le découvreur du neutron en Grande-Bretagne, et Irène et Frédéric Joliot en France, et, bien sûr, Hahn et Strassmann eux-mêmes.

11- François de Closets, *Ne dites pas à Dieu ce qu'il doit faire*, Le Seuil, 2004.

12- Depuis cette date, la Grande-Bretagne est étroitement liée sur le plan nucléaire aux États-Unis.

13- Il avait tellement peur de l'énergie qu'elle risquait de dégager que cette pile ne produisit qu'une énergie de 2 watts (une lampe de poche !).

14- Le chiffre officiel de 200 000 me paraît exagérément minoré car beaucoup sont morts plus tard, victimes des cancers créés par la radioactivité des produits qu'ils avaient ingérés. Voir G. Charpak, R. L. Garwin et V. Journé, *De Tchernobyl en Tchernobyls*, Odile Jacob, 2005.

## Chapitre 3

### Centrales nucléaires

**C. A. :** Quittons les bombes qui font peur, à juste titre, et revenons vers le nucléaire pacifique !

Les réacteurs nucléaires classiques sont eux aussi fondés sur l'exploitation de la fission de l'uranium 235 et la réaction en chaîne qu'elle induit. C'est une suite de réactions nucléaires entre les neutrons et les noyaux d'uranium 235. Comme nous l'avons dit, les neutrons provoquent la réaction, mais sont aussi les produits de la réaction. C'est cette double propriété qui provoque la réaction en chaîne. Cette suite de réactions nucléaires dégage une chaleur considérable qu'on essaye de récupérer pour générer de l'électricité.

Mais, à la différence d'une bombe dans une centrale, on évite que la réaction en chaîne ne devienne explosive. On la contrôle pour obtenir un état stationnaire, un régime permanent.

**D. de M. :** Comment fait-on ?

**C. A. :** On se sert des propriétés des neutrons. Les neutrons sont les agents de liaison, les vecteurs de la réaction ; si on contrôle leurs flux, on contrôle l'ensemble du processus.

Dans une centrale nucléaire de type classique, il y a cinq phénomènes essentiels :

- la fission des noyaux d'uranium 235 dont il faut contrôler le rythme,
- la récupération de la chaleur produite pour la transformer en électricité,
- le refroidissement de l'ensemble pour le maintenir à la même température,
- le confinement de l'ensemble pour que, s'il se produit un incident ou un accident, cela n'ait aucune conséquence sur l'environnement,
- enfin, qu'on s'assure que les éléments radioactifs produits lors de la fission ne contaminent pas l'environnement.

Ces conditions sont communes à toutes les centrales, de quelque type que ce soit.

**D. de M. :** Et à chaque étape, il peut y avoir un accident ?

**C. A. :** Absolument. Mais avec des probabilités différentes.

Le combustible, celui qui subit la fission, est l'uranium 235. Dans l'uranium naturel, cet isotope n'est présent qu'à 0,73 %. Il faut donc l'enrichir en isotope 235 pour avoir un rendement convenable.

**D. de M. :** Comment enrichit-on l'uranium naturel en son isotope 235 ?

**C. A. :** Par ultracentrifugation. Une centrifugeuse, c'est comme un immense panier à salade à rotation.

Dans un panier à salade, on fait tourner très vite les salades mouillées. Comme l'eau est plus lourde que la salade, et grâce à la force centrifuge, elle va se coller contre les parois.

On fait de même avec l'uranium. L'uranium naturel est un mélange d'atomes de 235 et d'atomes de 238, les derniers sont plus abondants et plus lourds. En les mettant dans une centrifugeuse gigantesque, on va obliger l'isotope lourd 238 à aller se coller au fond des tubes, et donc l'uranium 235 à surnager.

**D. de M. :** Ce sont ces opérations qui inquiètent les Occidentaux en Iran ?

**C. A. :** Oui, pour la raison suivante. Avec un uranium enrichi à 4 % d'uranium 235, on ne peut pas fabriquer une bombe atomique. Pour ce faire, il faut des enrichissements de 60 % au minimum, et de préférence de plus de 90 %.

Donc, si on connaissait le taux d'enrichissement de l'uranium iranien, on saurait si l'Iran cherche à construire des centrales pour produire de l'électricité, comme ses dirigeants le déclarent, ou s'il cherche à fabriquer une bombe atomique, comme les Occidentaux le soupçonne.

Le second problème, c'est celui des neutrons. Pour provoquer la fission, il faut des neutrons lents dont la vitesse est en moyenne de 2 kilomètres par seconde. Or, les neutrons qui sont émis lors d'un processus de fission sortent à une vitesse 1 000 ou 10 000 fois plus grande. Il faut donc les ralentir.

**D. de M. :** Comment ralentir les neutrons ?

**C. A. :** En immergeant l'uranium dans de l'eau. Les neutrons entrent en collision avec les molécules d'eau et s'amortissent. Au terme d'une vingtaine de collisions après son expulsion d'une fission, un neutron est de nouveau utilisable<sup>1</sup>.

**D. de M. :** C'est pour cela qu'à Fukushima on a eu peur que cette

**eau, par ailleurs en contact avec l'uranium, donc radioactive, ne soit vaporisée dans l'atmosphère ?**

**C. A. :** Exactement. Car cette eau est très radioactive.

La radioactivité ne vient pas de l'uranium mais du processus de fission et des réactions nucléaires secondaires qui produisent une kyrielle de produits plus radioactifs les uns que les autres. Ce sont les fameux déchets, ceux qu'il va falloir stocker et traiter.

Mais il faut une troisième condition pour que la réaction de fission se déroule bien : que le rythme de la réaction soit contrôlé ; ni trop rapide ni trop lent.

Pour contrôler le rythme de la réaction de fission en chaîne, on utilise des absorbeurs de neutrons, que l'on va mettre plus ou moins en contact avec le combustible.

On a utilisé autrefois le cadmium, mais c'était dangereux car en cas d'accident il peut s'enflammer. On utilise aujourd'hui du carbure de bore, excellent absorbant de neutrons et très résistant à la chaleur.

Tout cela pour éviter que la réaction en chaîne ne s'emballe.

**D. de M. :** Et que le réacteur ne devienne une bombe atomique ?

**C. A. :** Non, je vous l'ai déjà dit, un réacteur ne peut pas se transformer en bombe atomique. Ne propagez pas cette idée ! Il y a suffisamment de gens qui le croient.

**D. de M. :** Pourquoi un réacteur ne peut-il pas se transformer en bombe ?

**C. A. :** Je le répète ! Parce que l'uranium 235 n'est pas assez abondant. Dans un réacteur moderne, il ne représente que 4 % de l'uranium total. Pour faire une bombe à fission, il faut avoir de l'uranium beaucoup plus pur. À Hiroshima, l'uranium 235 représentait 80 %. Ensuite, on est passé à 95 %.

**D. de M. :** Qu'est-ce qui arrive alors si la réaction s'emballe dans le cœur ?

**C. A. :** La température va s'élever de plus en plus et le fluide va se vaporiser.

Si la température continue à augmenter, la pression va elle aussi augmenter puisque, dans la vapeur, la pression augmente avec la température. C'est la fameuse loi de Boyle-Mariotte<sup>2</sup>. Lorsque la pression du gaz devient supérieure à la résistance des parois elles vont se fendre, le gaz va alors se répandre dans toute l'enceinte du réacteur. Une partie des molécules d'eau, H<sub>2</sub>O, vont se dissocier et se transformer en hydrogène et oxygène. Or,

l'hydrogène est un gaz très inflammable donc très dangereux.

### **D. de M. : Le tout va donc exploser ?**

**C. A. :** Vous voulez m'entraîner dans le catastrophisme ambiant et parler des accidents avant même de savoir comment ça marche ! Mais, pour vous rassurer tout de suite sur l'hydrogène, je vous signale que les centrales françaises possèdent un catalyseur qui fait que, dès qu'il est formé, l'hydrogène se lie à nouveau avec l'oxygène, pour redonner de l'eau. Et sans explosion. Ce système d'« hydrogène recombinant » n'existe pas, hélas, sur les centrales japonaises.

Mais nous allons revenir au fonctionnement du cœur du réacteur, là où se produit la réaction de fission.

Le cœur est formé par des pastilles d'uranium enrichi enfilées dans de longs cylindres de métal. Entre ces cylindres, il y a la place pour insérer les barres de contrôle (carbure de bore). Elles sont habituellement relevées, mais dès la moindre alerte, elles retombent, isolant les cylindres de combustible. Le tout se trouve dans une enceinte d'acier très épais (15 centimètres environ), la cuve du réacteur.

Lorsque la réaction est enclenchée, elle dégage une quantité énorme de chaleur.

### **D. de M. : Comment transforme-t-on cette chaleur en électricité ?**

**C. A. :** En actionnant des turbines à vapeur, avec de la vapeur d'eau surchauffée.

Il y a là deux options.

Où il y a un seul circuit d'eau, ou il y en a deux. Dans le premier cas, l'eau chauffée par les réacteurs nucléaires est la même que celle qui fait fonctionner les turbines. Dans le jargon nucléaire, c'est ce que l'on appelle les centrales à eau bouillante. Les centrales japonaises<sup>3</sup> sont de ce type.

La seconde solution consiste à avoir deux circuits d'eau. L'un en contact avec le combustible nucléaire, un second chauffé par le premier par le biais d'un échangeur de chaleur qui fait fonctionner la turbine. Les centrales françaises et américaines sont de ce type.

Comme on peut le comprendre, les premières sont plus simples, plus rustiques, moins chères que les secondes, mais aussi beaucoup moins sécurisées.

Dans le premier cas, le cas japonais, s'il y a une fuite de vapeur d'eau, cette eau est automatiquement radioactive et va donc contaminer l'extérieur. Dans le second, il faut atteindre l'eau du circuit primaire pour contaminer l'extérieur. Or, ce circuit est très protégé. L'eau du circuit secondaire, plus facile à atteindre, n'est pas radioactive. La preuve, c'est qu'à Tricastin on l'utilise pour alimenter une ferme à crocodiles ! Et les crocodiles ne sont pas

radioactifs.

À Fukushima, à cause de la question de surchauffe et pour éviter que la pression ne fasse éclater la cuve contenant le cœur, on a été obligé de laisser échapper volontairement de la vapeur. Mais comme la source de cette vapeur était dans le circuit primaire, elle était radioactive. Donc les nuages radioactifs pointés du doigt par les médias étaient le résultat non d'accidents mais de manœuvres des techniciens pour éviter l'explosion. Ces relargages étant considérés comme un moindre mal !

**D. de M. : Mais dans le cas des centrales françaises, comment ça marche ?**

**C. A. :** Le circuit primaire contient de l'eau portée à 300 °C. Pour éviter qu'elle ne bouille et se transforme en vapeur, on la comprime, et plus précisément on la maintient à une pression de 155 atmosphères<sup>4</sup>.

Ce circuit primaire passe par un échangeur de chaleur qui chauffe l'eau du circuit secondaire. C'est la vapeur secondaire qui va actionner les turbines productrices d'électricité.

C'est un montage beaucoup plus sûr que les centrales à eau bouillante.

Mais la question la plus préoccupante, celle qui est à l'origine de la plupart des accidents et en particulier des trois accidents majeurs, Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima, et en France l'accident de Saint-Laurent-des-Eaux, c'est le refroidissement.

**D. de M. : On ne parle jamais de Saint-Laurent-des-Eaux, vous admettez qu'il y a eu un accident ?**

**C. A. :** Oui, un accident mais pas une catastrophe. Nous en reparlerons.

Le refroidissement est la question qui apparaît de plus en plus comme déterminante.

Il faut donc refroidir le cœur, tout en le contrôlant.

Mais il y a d'autres parties qu'il faut aussi refroidir. Et d'abord le circuit qui fait marcher les turbines.

Dans le cas du Japon, il fallait éviter une vaporisation totale du circuit primaire, dans le cas des centrales françaises, il faut éviter que le circuit secondaire ne rejette dans l'environnement (les fleuves, la mer) de l'eau à 80 °C !

Il faut refroidir le circuit secondaire avant qu'il puisse relarguer l'eau dans la nature. Mais il faut aussi refroidir les anciens combustibles. L'uranium 235 s'épuise petit à petit. Même s'il n'est pas totalement utilisé, après un certain temps, on enlève les cylindres d'uranium usé pour les remplacer par des neufs. Les cylindres « usés » sont très radioactifs et donc très chauds. Il faut les refroidir. On les sort alors du réacteur et on les plonge dans une cuve de 1 000 mètres cubes d'eau, ce qu'on appelle les piscines. La

chaleur du vieux combustible est maintenue par les innombrables radioactivités à courte période dont il faut attendre la mort avant de pouvoir le retraiter. Dans les piscines, on attend deux ou trois ans avant de sortir les cylindres et de les manipuler.

La conclusion de tout cela, c'est que, après l'uranium enrichi, l'eau est l'ingrédient essentiel du nucléaire. C'est pourquoi on a installé les centrales au bord de la mer ou au bord des fleuves. Il n'est pas possible de construire une centrale nucléaire dans un désert – si l'on n'a pas une source abondante d'approvisionnement en eau. Et en eau fraîche ! Sinon il y a un problème !

**D. de M. : Comme ça s'est produit en 2003 avec la canicule ?**

**C. A. :** Oui ; où vous vous souvenez que la ministre de l'Industrie de l'époque, Mme Fontaine, a fait ralentir l'activité des centrales.

Au Japon, les centrales ont bien résisté au séisme pourtant exceptionnel, par contre, elles n'ont pas résisté au tsunami parce qu'il a interrompu les systèmes de refroidissement.

Nous devons tirer des conséquences pour la France de l'une et l'autre de ces observations.

**D. de M. : Quels enseignements en tireriez-vous vous-même ?**

**C. A. :** Bien sûr, sécuriser davantage les systèmes de refroidissement, mais peut-être aussi, comme le proposent un certain nombre d'experts, moins compter sur l'eau. On étudie aujourd'hui comment on pourrait faire des refroidissements par air ou des systèmes de refroidissement utilisant davantage la vaporisation de l'eau<sup>5</sup>.

Voilà une conclusion certaine à tirer de l'expérience Three Mile Island, Tchernobyl, Saint-Laurent-des-Eaux, Fukushima ; tous ces accidents ont montré la nécessité de progresser dans ce secteur.

**D. de M. : Et le confinement ?**

**C. A. :** J'allais en parler. Cela inclut la cuve dans laquelle on immerge le cœur, et puis autour les enceintes qui entourent les circuits primaires et secondaires. Il faut dans doute les renforcer, c'est ce qu'on a fait avec le projet EPR<sup>6</sup>. Peut-être aussi faut-il prévoir systématiquement un renforcement de la solidité de l'enceinte ou même une enceinte supplémentaire pour parer à toute éventualité ?

**D. de M. : Mais dans ce cadre, les centrales françaises, ou plus généralement européennes, sont-elles sûres ?**

**C. A. :** Dans ces centrales, la sécurité est à mon avis bien maîtrisée. Les



enceintes qui contiennent les divers circuits sont robustes, le risque sismique est calculé et bien maîtrisé. Et il y a des contrôles réguliers par une autorité indépendante.

**D. de M. : Mais pourtant, il y a eu des accidents nucléaires, y compris en France ?**

**C. A. :** Il faut les examiner, en connaître la cause et en tirer les conséquences.

**D. de M. : Il ne faut surtout pas les cacher ou les minimiser.**

**C. A. :** Bien sûr. Nous reviendrons sur cette question de la transparence car aujourd'hui c'est un paramètre essentiel du débat public et politique sur le nucléaire !

Le premier accident a eu lieu en France le 17 octobre 1969, à la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux, dans le Loir-et-Cher. Une erreur de manipulation entraîne la fusion de 50 kilos d'uranium. On contrôle très vite la situation qu'officiellement on qualifiera d'incident et dont la publicité ne dépassera pas l'hexagone.

Le deuxième accident s'est produit le 28 mars 1979 à la centrale américaine de Three Mile Island, en Pennsylvanie. L'opérateur Metropolitan Edison minimise l'accident et fait un black-out total sur l'information. L'Amérique s'impatiente car des rumeurs se propagent. Jimmy Carter, Président responsable et courageux, visite la centrale pour apaiser les craintes croissantes sur une possible explosion nucléaire ! On saura plus tard que l'accident a été dû à des erreurs humaines mais qu'on a rapidement maîtrisé la situation. Pour autant, l'effet psychologique sur la population américaine sera désastreux. Et sur le monde encore plus. Si les Américains ne contrôlent pas leurs centrales, que dire du reste du monde !

**D. de M. : Et puis il y a eu Tchernobyl, l'accident qui s'est transformé en catastrophe. C'est lui qui a joué le rôle majeur dans la perception collective du nucléaire civil.**

**C. A. :** Oui, bien sûr, mais il ne faut pas minimiser Three Mile Island car ce petit accident a eu un énorme impact psychologique sur l'Amérique. C'est à la suite de cela que les États-Unis ont ralenti leur programme nucléaire.

Mais Tchernobyl a été en effet la catastrophe, car là j'emploie sans hésiter ce terme, qui a marqué le monde, le 26 avril 1986.

Je m'en souviens très bien, car ce jour-là je participais à la réunion annuelle de l'Académie des sciences des États-Unis où je venais d'être élu. L'émotion était à son comble.

Les physiciens américains étaient pendus au téléphone, et on recevait

des informations d'heure en heure de plus en plus angoissantes.

**D. de M. : Et que s'est-il passé exactement ?**

**C. A. :** Par suite d'erreurs humaines invraisemblables et d'une expérience de contrôle stupide des techniciens chargés de la maintenance, tout va s'emballer. Le réacteur va entrer en fission, l'eau radioactive surchauffée va faire éclater le toit (il n'y a pas à proprement parler d'enceinte de confinement). Un énorme panache radioactif va se répandre dans l'atmosphère.

**D. de M. : Qui va tout contaminer jusqu'en France. C'est à cette occasion que le professeur Pellerin, responsable de la sûreté nucléaire, va faire cette déclaration stupéfiante suivant laquelle le nuage s'était arrêté à la frontière française !**

**C. A. :** Ça partait d'une bonne intention, celle de ne pas affoler les populations, car, contrairement à ce qu'ont affirmé certains, la radioactivité répandue notamment dans la vallée du Rhône n'a jamais été extrême. En revanche, les dégâts autour de Tchernobyl ont été gigantesques, surtout pour les riverains, mais aussi très au-delà.

Plus encore, on a envoyé des ouvriers et des techniciens mal équipés, mal protégés, manipuler des substances hautement radioactives. On peut dire que ces personnels ont été sacrifiés. Ce furent les fameux liquidateurs mentionnés dans tous les rapports sur Tchernobyl.

**D. de M. : Combien de victimes ?**

**C. A. :** C'est très difficile à dire. Les autorités internationales de sûreté nucléaire évaluent le nombre de victimes à 4 000. Les associations écologiques militantes avancent des chiffres de plus de 100 000, certaines jusqu'à 1 million. Je crois ces derniers chiffres exagérés, mais d'après ce que je peux comprendre des rapports officiels, un chiffre de 20 000 ou 40 000 ne me paraîtrait pas impossible. Toutefois, c'est très incertain et je ne le garantis pas.

**D. de M. : C'est, quoi qu'il en soit, énorme.**

**C. A. :** Oui, c'est énorme. Mais il faut préciser que cette centrale était ancienne, avec des technologies de contrôle extrêmement vétustes, que l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) l'avait dénoncée depuis de nombreuses années et qu'une bêtise humaine invraisemblable a été commise.

De plus, élément à peine croyable, la centrale n'avait pas de structure de

confinement mais un simple toit qui a très vite explosé.

**D. de M. : Et vous ne parlez pas de la centrale du Blayais qui est tombée en panne le 27 décembre 1999, victime d'une inondation et de la fameuse tempête.**

**C. A. :** Ce gros incident a très vite été maîtrisé et n'a rien à voir avec les cas précédents.

**D. de M. : D'après vous, les centrales françaises sont-elles sûres ?**

**C. A. :** Tout en spécifiant que le risque zéro n'existe pas, je crois que oui. Il y a des dispositifs de contrôle systématique liés à la direction de la sûreté nucléaire, aujourd'hui organisme indépendant, et il y a des améliorations constantes effectuées par EDF. Enfin, il y a de plus en plus de transparence.

EDF n'hésite plus à dire qu'en une année il y a 700 incidents mineurs dans les 58 centrales du parc français et à rendre publics les incidents et leur nature.

Il faut comparer cela avec l'opérateur japonais Tepco qui pendant des années a affirmé que tout était parfait. Affirmation validée par les autorités gouvernementales japonaises ! Pendant les dix premiers jours de la crise, il a eu la même attitude d'opacité et de mensonge, et pendant dix jours a refusé la coopération des instances étrangères compétentes (américaines ou françaises). En dernier lieu, alors qu'il ne contrôle pas bien, qu'il fait des erreurs énormes sur les mesures de radioactivité, il appelle au secours EDF, Areva et le CEA !

**D. de M. : Mais les centrales françaises ne sont-elles pas trop vieilles ?**

**C. A. :** Vous savez, c'est comme Notre-Dame. Elle a été conçue en 1163 mais, depuis, on a changé la façade vers 1220, les chapelles au XIV<sup>e</sup> siècle, on a remplacé les vitraux au XVIII<sup>e</sup> et au XX<sup>e</sup> siècle, etc. Est-elle encore une cathédrale du XII<sup>e</sup> siècle ?

Nos centrales nucléaires sont entretenues avec un tel soin qu'elles n'ont plus rien à voir avec les centrales construites initialement. Sauf la cuve et l'enceinte extérieure, tout a été changé, et certains organes plusieurs fois. Pour ne prendre qu'un exemple, le contrôle utilisant à fond les progrès de l'informatique, il y a des contrôleurs partout. La température ici, le taux de radioactivité là, etc. Bien sûr, il ne s'agit pas de parler de siècle comme durée de vie, mais d'un demi, oui.

Oui, globalement on peut dire que nos centrales sont bien entretenues et surveillées, même s'il faut être toujours plus exigeant sur la sécurité. Mais je ne suis pas en mesure de vous dire aujourd'hui quelle centrale il faudra

remplacer ni quand. Et je ne crois pas que, hors du cercle des techniciens spécialisés, personne le soit.

**D. de M. : Mais alors, où est le danger nucléaire en France ?**

**C. A. :** Cessons de voir le danger partout ! Je préfère que l'on dise : où sont les problèmes posés par le nucléaire ? Où sont les risques ?

Ce ne sont ni les séismes ni les tsunamis comme au Japon qui menacent nos centrales. Ce sont les déchets et aussi le futur, mais cette question est d'une autre nature.

Les déchets, parce que les solutions actuelles sont insuffisantes et que cette question reste préoccupante.

Le futur du nucléaire est lié aux réserves d'uranium et à sa place dans le problème général de l'énergie avec l'émergence de nouvelles technologies de production d'énergie.

**D. de M. : Donc vous êtes d'accord avec Daniel Cohn-Bendit lorsqu'il déclare que si la question des déchets était réglée il ne serait pas adversaire du nucléaire ?**

**C. A. :** Bien qu'il ne connaisse rien au sujet et qu'il parle comme la plupart des écologistes par pulsions, ouï-dire et interdictions, je ne suis pas loin de partager une partie de son jugement ! Je précise ma pensée : en France, les déchets ne sont pas entreposés n'importe où n'importe comment. Ils sont retraités à La Hague et seront stockés en un site aménagé. Mais ailleurs, c'est une autre histoire. Je ne veux dénoncer aucun pays, mais je sais que la question est loin d'être parfaite, y compris chez nos amis les Allemands. De toute manière, il faut améliorer le système même pour nous, c'est l'une des contraintes essentielles qui devront guider nos choix sur les filières du futur.

Pour les déchets, il faut en distinguer plusieurs types : le plutonium qui est produit par des réactions nucléaires secondaires sur l'uranium 238 ; les produits de la réaction de fission comme l'iode 135 ou le technecium ; enfin, les isotopes qui sont produits par les réactions nucléaires agissant sur les produits de fission. Tout cela est très complexe. Les déchets à vie courte meurent vite mais ceux à vie longue s'ils ne sont pas bien contrôlés risquent de polluer gravement l'environnement.

**D. de M. : Vous ne considérez donc pas que la question des déchets est réglée ?**

**C. A. :** Pas le moins du monde ! Et cela ne date pas d'aujourd'hui !

Lorsque j'étais président du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), je me suis trouvé devant un dilemme. On voulait enterrer les déchets à 3 ou 4 000 mètres de profondeur. On allait faire un méga forage puis

on mettrait ces maudits déchets au fond et on recouvrirait le tout de terre. Et on n'en parlerait plus !

Je considérerais cette solution comme coûteuse, inutile géologiquement et psychologiquement dangereuse.

Et, depuis deux ans, je m'étais exprimé sur le sujet.

Le *hic*, c'est que le BRGM allait être associé à l'opération avec un énorme contrat à la clé. Les syndicats venaient me supplier de me renier. « Monsieur le Président, je vous en prie, il faut que vous disiez que c'est une bonne solution, que vous avez changé d'avis, des contrats juteux pour nous sont associés à cette entreprise. »

Dilemme cornélien. Je décidai non de me contredire, mais de ne pas intervenir ; la bataille que j'avais menée pendant cinq ans trouva pourtant la solution que je souhaitais. On décida d'enterrer les déchets à 400 mètres de profondeur, au-dessus de la nappe phréatique et de manière que l'enfouissement soit réversible. Qu'on puisse récupérer les déchets et les traiter si les progrès de la science le permettaient.

Pour moi, cette décision était plus que technique, elle était philosophique. Au lieu d'enterrer les déchets pour s'en débarrasser, on les stocke de manière à les surveiller, on n'enterre pas le danger, on lui fait face et on surveille les évolutions.

Le risque zéro n'existe pas. Être responsable, c'est faire face au risque et minimiser ses effets !

Aujourd'hui, la situation concernant les déchets n'est pas tragique en France, mais ce n'est pas pour moi un problème résolu, je m'expliquerai lorsqu'on parlera du futur du nucléaire.

**D. de M. : Mais, finalement, on en revient à l'époque des Curie : le risque, n'est-ce pas la radioactivité ?**

**C. A. :** Le risque est surtout la peur irraisonnée, l'ignorance, le réflexe de l'autruche. C'est, avant tout, cela que je combats.

La radioactivité bien contrôlée n'est pas un danger. À dose modérée, c'est un élément banal de notre environnement. Seules les hautes doses et une exposition prolongée sont dangereuses !

1- Dans les anciennes centrales comme celle de Tchernobyl, on utilisait comme ralentisseur le graphite. C'est lui qui s'est enflammé et a amplifié le désastre. On ne l'utilise plus aujourd'hui.

2- Pression  $\times$  Volume =  $n \times$  Résistance  $\times$  Température ( $n$  = nombre de moles).

3- De fabrication américaine.

4- D'où le nom de ces centrales dites à eau pressurisée.

5- Voir l'interview de Robert Klapisch dans *Le Point* du 24 mars 2011.

6- Initialement European Pressurized Reactor, puis Evolutionary Power Reactor : nouveau type de réacteur nucléaire dit de troisième génération.

## **Chapitre 4**

### **Faut-il avoir peur de la radioactivité ?**

**D. de M. :** Finalement, ce que tout le monde redoute, c'est la radioactivité ! C'est d'être irradié ou contaminé. Rien que le mot de *radioactivité* fait peur...

**C. A. :** Pourquoi ce sentiment de peur vis-à-vis de la radioactivité ? C'est le résultat de plusieurs facteurs. Le premier est lié au caractère invisible et indétectable par nos sens des rayonnements produits par la radioactivité. Ils peuvent pénétrer notre corps sans que nous voyions rien, sans que nous sentions rien, sans que nous remarquions rien. C'est le danger invisible. Certes, il y a beaucoup plus de danger lorsque nous voyageons en voiture ou en avion, mais le danger est là : concret, palpable, certes potentiel mais bien cerné, bien défini. En ce sens, le nucléaire militaire est paradoxalement implicitement mieux accepté que le nucléaire civil. D'ailleurs, il n'y a plus de manifestations pour exiger la réduction des stocks d'armes nucléaires. Il y a des manifestations pour « sortir du nucléaire ». Le second facteur qui suscite la peur, c'est le caractère différé de l'action du rayonnement. On apprendra cinq ou dix ans plus tard qu'on a un cancer dû à une irradiation passée. Lorsqu'on a un accident de voiture, d'avion ou lorsqu'une usine chimique explose, c'est brutal, terrible, mais les effets sont immédiats, instantanés ou presque. Les dangers radioactifs sont ressentis comme une espèce d'épée de Damoclès au-dessus de nos têtes. Avec, bien sûr, omniprésent l'amalgame civil-militaire.

**D. de M. :** Vous avez raison, le caractère invisible et différé du danger des irradiations donne au nucléaire un caractère particulier...

**C. A. :** ... d'autant plus que les mesures de la radioactivité sont extrêmement sensibles, et que l'on détecte de la radioactivité à peu près partout : dans les roches, les murs des maisons, la viande, les légumes, le corps humain, etc. On a l'impression d'être littéralement assiégé par la radioactivité. Les experts nous disent que les doses que nous recevons

habituellement sont sans danger, mais faut-il les croire ? Ils nous ont tellement menti dans le passé qu'on ne peut plus les croire les yeux fermés.

**D. de M. : Vous avez raison. Par suite de comportements opaques dans le passé ou de déclarations systématiquement rassurantes, les experts sont souvent inaudibles ou plutôt incroyables. Dans ce petit livre, donnez-nous des éléments de réflexion plutôt que des affirmations. Et tant pis si cela rend certains passages peut-être un peu plus difficiles : c'est le prix à payer si l'on veut ne pas être le jouet des experts. Essayez tout de même de simplifier !**

**C. A. :** Merci de me donner cette liberté. Le savoir nécessite toujours quelques efforts pour l'acquérir. Rappelons quelques notions essentielles que nous avons introduites au chapitre 2. La radioactivité est une transmutation de certains atomes en d'autres atomes. Au cours du processus, il y a émission de rayonnements...

**D. de M. : Ce sont ces rayonnements qui nous préoccupent, ou nous angoissent !**

**C. A. :** Oui, bien sûr. Mais il faut d'abord bien identifier les émetteurs radioactifs. Il existe deux sortes de radioactivités. Celles, naturelles, qui ont été découvertes par les pionniers Becquerel, les Curie, Rutherford, Soddy<sup>1</sup> et quelques autres. Mais il y a aussi les radioactivités artificielles. Le phénomène a été découvert en 1934 par Irène et Frédéric Joliot. Depuis, il a donné lieu à de multiples exemples.

**D. de M. : Où se trouvent les produits radioactifs ?**

**C. A. :** Les radioactivités naturelles sont relativement limitées. Il y a les séries radioactives, liées à la désintégration des trois têtes de série : uranium 238, uranium 235, thorium 232. Ces trois produits ont des « périodes » de l'ordre du milliard d'années, et existent depuis l'origine de la terre. Les radioactivités de ces trois éléments sont, grosso modo, quinze fois moins importantes que celles des chaînes radioactives auxquelles ils donnent naissance. Des éléments radioactifs aussi célèbres que le polonium, le radium ou le radon sont des éléments de ces chaînes. Il n'y a guère qu'un seul autre élément très actif : le potassium 40.

**D. de M. : Et les radioactivités artificielles ?**

**C. A. :** Elles sont d'abord produites lors des réactions de fission, comme on l'a dit. Soit directement par la fission, soit secondairement par réaction nucléaire à partir des neutrons de fission sur les divers éléments chimiques

présents dont les produits de fission eux-mêmes. Il y a aussi de nombreux produits radioactifs produits par des centrales ou des accélérateurs d'électrons à des fins médicales ou à des fins scientifiques. Les éléments radioactifs sont utilisés comme traceurs des phénomènes biologiques et sont des outils courants dans les laboratoires. Mais il y a aussi les éléments radioactifs produits par les bombes nucléaires.

**D. de M. : Mais les bombes, depuis 1945, on n'en utilise plus, Dieu merci !**

**C. A. :** Détrompez-vous ! On a réalisé, depuis, 543 expériences d'explosions atomiques dans l'atmosphère. Aux États-Unis : 219. En Union soviétique : 219. En France : 50. En Grande-Bretagne : 35. En Chine : 22. Ces explosions ont contaminé l'atmosphère de produits radioactifs. Et puis il y a les centrales nucléaires qui produisent des déchets radioactifs. À cela, il faut ajouter quelques radioactivités naturelles, mais produites par des réactions nucléaires comme le fameux carbone 14 ou le tritium (isotope de masse 3 de l'hydrogène) produit par réactions nucléaires dans l'atmosphère.

**D. de M. : Pourquoi les rayonnements produits par la radioactivité sont-ils dangereux ?**

**C. A. :** Ces rayonnements sont de trois types. Les rayons  $\alpha$  sont des noyaux d'hélium ionisé. Ils ne sont guère dangereux, car ils sont arrêtés par une feuille de carton ! Les rayons  $\beta$ , ce sont des électrons, donc des particules très légères et chargées négativement. Elles pénètrent la matière plus profondément – mais en collision avec d'autres électrons – et les déplacent parfois. Enfin, il y a les rayons  $\gamma$ , les plus dangereux. Ce sont des rayons X, mais d'un type très pénétrant, ils pénètrent parfois plusieurs mètres de matière. Ils provoquent des dégâts sur la matière, notamment en chassant des électrons liés aux atomes. Ils transforment ainsi les atomes en ions (un atome qui a perdu ou gagné un électron s'appelle un ion). Ainsi peuvent-ils casser les liaisons chimiques entre atomes, et donc perturber ou même endommager les molécules. Ce sont ces interactions avec la matière qui sont dangereuses pour notre corps mais aussi qui sont mises à profit pour détecter la radioactivité.

**D. de M. : Par exemple ?**

**C. A. :** L'exemple le plus simple est la plaque photographique qui est noircie par les rayonnements. C'est ce qui a permis à Becquerel de découvrir la radioactivité. C'est ce qu'on utilise pour vérifier que les chercheurs, les médecins ou les techniciens du nucléaire n'ont pas reçu des doses supérieures aux normes. On accroche à leur blouse une petite plaque photo qu'on examine



chaque soir ! C'est aussi le très célèbre compteur Geiger.

**D. de M. : Comment ça marche ?**

**C. A. :** Un gaz est enfermé dans une boîte dans laquelle on a monté deux électrodes chargées de signes contraires. Lorsqu'un rayon  $\beta$  ou  $\gamma$  ionise une molécule de gaz, elle est attirée par le fil central chargé positivement. Chemin faisant, elle se cogne à son tour à d'autres molécules et les ionise. Attirées par le fil central, ces molécules sont, à leur tour, des projectiles. On a ainsi un phénomène en cascade, c'est donc un véritable amplificateur du signal initial. D'autres appareils sont fondés sur des principes un peu différents. Mais ils ont tous la même propriété, c'est d'être extrêmement sensibles, de pouvoir détecter des radioactivités très faibles. Cette extrême sensibilité n'est pas sans rapport avec la peur suscitée par la radioactivité.

**D. de M. : Mais la matière vivante, nous avez-vous dit, est sensible, elle aussi, aux rayonnements.**

**C. A. :** Bien sûr, comme toute matière.

**D. de M. : C'est cela qui crée la peur panique qu'inspirent les radiations.**

**C. A. :** Oui, mais de manière irrationnelle et le plus souvent totalement injustifiée.

**D. de M. : Mais recevoir des radiations peut être dangereux !**

**C. A. :** Recevoir des doses importantes d'irradiation est sans conteste dangereux. Mais, d'un autre côté, nous recevons tous les jours des doses d'irradiation, quoi que nous fassions. Et nous ne nous en portons pas plus mal. Car il existe une radioactivité naturelle dont nous subissons tous les effets et qui, apparemment, ne nous empêche pas de vivre. Nous vivons dans un bain de rayonnements.

**D. de M. : Que voulez-vous dire exactement ?**

**C. A. :** Nous recevons continuellement des doses d'irradiation sous forme de rayons X, de rayons gamma ou de particules. Les deux premiers sont de même nature (ou dit en langage savant, électromagnétiques). Les particules sont des composants microscopiques de la matière : électrons, neutrons, protons.

**D. de M. : D'où viennent ces irradiations ?**

**C. A. :** De partout ! Nous recevons du soleil, de la lumière mais aussi des particules. Nous recevons continuellement un rayonnement venant de l'espace qu'on appelle rayonnement cosmique galactique<sup>2</sup> (et lorsqu'on prend l'avion, ce rayonnement est multiplié par dix). Nous recevons un rayonnement provenant des éléments radioactifs naturels contenus dans les roches et tous les matériaux de construction (nos murs sont radioactifs). Nous sommes soumis aux irradiations d'origine médicale : radiographie et scanner, radiothérapie, rayonnement provenant de produits radioactifs médicaux dispersés dans l'environnement. Notre corps lui-même est radioactif, et nous irradie. Nous avons absorbé du carbone 14 et du potassium 40 qui sont radioactifs, et qui irradient nos organes de l'intérieur. Dans notre corps se produisent chaque seconde 8 000 désintégrations radioactives. La majorité est absorbée par nos tissus, car ce sont des électrons provenant du carbone 14 et du potassium 40, et ils ne sont donc pas détectés de l'extérieur. L'unité d'une source radioactive est mesurée par une unité qu'on appelle le becquerel (Bq). C'est l'activité d'une source radioactive d'un événement par seconde. La radioactivité du corps humain est de 120 Bq/kg, celle d'un granite de 6 000 Bq/kg. La radioactivité émise par un homme de 70 kilos est à peu près celle de 1,2 kilo de granite ! Un mur en granite de 4 centimètres d'épaisseur émet 750 000 Bq par mètre carré. Durant une année, votre corps est soumis à deux cent quarante milliards d'irradiations par des électrons qui vous bombardent de l'intérieur même de votre corps.

#### **D. de M. : Ce que vous dites donne le frisson !**

**C. A. :** Il n'y a pas de raison. C'est, au contraire, pour vous montrer l'irrationalité des paniques car, si l'humanité ne supportait pas de telles doses, notre espèce aurait disparu. Ces chiffres devraient, au contraire, vous rassurer. La réaction que vous avez est très caractéristique et très illustrative de ce que ressentent les gens. Comme on l'a dit, une caractéristique de la radioactivité, c'est qu'on peut la mesurer avec une extraordinaire sensibilité. Dans les appareils dédiés à la mesure du carbone 14 pour dater les momies égyptiennes, on sait détecter sans problème une désintégration par minute ! Cette performance technique a des conséquences psychosociologiques considérables. Donnez à quelqu'un un compteur Geiger : il va immédiatement détecter de la radioactivité partout et, dès qu'il va trouver un objet ou un lieu particulièrement élevé, il va paniquer. À cet effet, on peut raconter une histoire qui a un rapport direct avec ce livre. Le gouvernement belge désirait enterrer les déchets radioactifs dans les Ardennes, et avait décidé de jouer la transparence pour mieux faire accepter le projet par la population locale. Pour cela, il distribua à la population des compteurs Geiger. On pouvait ainsi mesurer la radioactivité ambiante avant enfouissement des déchets, pendant et après. C'était, je m'empresse de le dire, une bonne manière de prendre le

problème. Seulement voilà : l'un des villageois du site est allé à Bruxelles en emportant son compteur Geiger. Il en revint affolé. Il avait sorti son compteur sur la Grand-Place de Bruxelles, et ce dernier s'était mis à crépiter sans arrêt. Bruxelles était radioactive, dix fois plus que le village : il fallait agir. Sans doute des déchets radioactifs étaient-ils dissimulés dans une cave, pensa-t-il. En fait, il s'agissait tout simplement des trottoirs en granite qui se trouvent sur la Grand-Place de Bruxelles ! C'était une radioactivité naturelle. Mais il avait suffi d'une mesure de compteur Geiger pour sonner l'alarme... Pour traduire l'effet biologique des radiations, on a défini une unité qui intègre les doses reçues mais aussi le coefficient d'efficacité de telle ou telle radiation sur la matière vivante. On appelle cela le sievert.

**D. de M. : Dans ce domaine, on s'y perd. Il y a des unités dans tous les sens : le becquerel, le curie, le roentgen, le sievert, et je crois me souvenir que votre ami Georges Charpak avait utilisé le dari (dose annuelle de radiations internes)...**

**C. A. :** C'est la dose annuelle de radiations présente dans le corps humain et créée par le carbone 14 et le potassium 40. 1 dari<sup>3</sup> = 170 micro-sievert. La dose que nous recevons par la radioactivité naturelle est d'environ 2,38 milli-sievert, soit 14 dari.

**D. de M. : Tous ces chiffres – exprimés en des unités auxquelles on n'est pas habitué – donnent le tournis.**

**C. A. :** Je le comprends, mais ce sont les différences qui sont significatives. Avec comme référence le fait que nous recevons 2,4 milli-sievert par an, et que cela n'a aucune incidence sérieuse sur notre santé. Ainsi estime-t-on à 250 milli-sievert (1 470 dari) le seuil à partir duquel il faut être vigilant. Une dose de 1 000 milli-sievert (5 880 dari) induit des modifications des globules blancs du sang. 2,4 sievert (58 800 dari) est le seuil où l'on estime que la probabilité de cancers est élevée. 5 000 milli-sievert (30 000 dari) est le seuil de la dose mortelle estimée. C'est quand même trente mille fois l'irradiation reçue par notre corps.

**D. de M. : Comment a-t-on obtenu ces chiffres ?**

**C. A. :** C'est le résultat de longues enquêtes statistiques faites sur des personnes en bonne santé, mais aussi sur des personnes irradiées. Et c'est vrai que, pendant une longue période, ceux qui manipulaient la radioactivité pour des raisons médicales, scientifiques, techniques ou militaires n'ont pas pris assez de précautions. Le pire a été, bien sûr, dans le domaine militaire. On estime aujourd'hui que les expériences nucléaires militaires dans l'atmosphère ont tué 170 000 personnes. Il est vrai qu'il y a eu, tous pays confondus, plus

de 500 explosions de bombes dans l'atmosphère. Les nuages radioactifs couvriraient toute la Terre ! Bien sûr, à cette époque, les experts disaient : « Ce n'est pas dangereux ! »

**D. de M. : Et c'est pourquoi aujourd'hui les citoyens du monde entier sont méfiants ou incrédules lorsque les autorités font des déclarations rassurantes.**

**C. A. :** Naturellement. Et la France n'a pas été un exemple de transparence en ce domaine, il faut le reconnaître, y compris lors des expériences de Polynésie ou au Sahara. Aujourd'hui, les tribunaux condamnent l'État à des dédommagements bien tardifs. Et beaucoup de ces acteurs sont morts. En même temps – il est honnête de mettre cela en parallèle – des milliers de cancers ont été guéris grâce à des irradiations radioactives.

**D. de M. : Ces traitements des cancers par irradiation sont-ils fiables ?**

**C. A. :** Absolument. Certes, si on irradie des tissus humains sains à dose importante, on risque de provoquer la naissance d'un cancer. Mais, à l'inverse, si quelqu'un a un cancer, on peut bombarder les cellules malignes pour les détruire et les empêcher de se reproduire. C'est le principe de la radiothérapie. Ce qui est, bien sûr, dangereux, c'est l'inhalation ou l'ingestion d'isotopes radioactifs. Du coup, si les isotopes radioactifs se trouvent à l'intérieur du corps, ils vont l'irradier de l'intérieur, directement. Ils pourront se fixer sur certains organes et en détruire les cellules. Car, on l'a dit, une propriété des isotopes, c'est de se comporter chimiquement de manière identique. Un isotope radioactif peut donc remplacer un isotope stable dans n'importe quel composé chimique, que ce soit une protéine ou un acide nucléique de l'ADN. C'est pour éviter cela qu'en cas de danger d'iode radioactif, on fait ingérer des pilules d'iode ordinaire. Cet iode va aller se fixer sur les composants de la thyroïde et diluera l'iode radioactif 131 ou 129, l'empêchant de se fixer à haute dose dans les tissus<sup>4</sup>.

**D. de M. : Mais quels sont les chemins par lesquels on peut être irradié ?**

**C. A. :** On distingue, dans le vocabulaire, « irradié », c'est-à-dire soumis aux radiations, et « contaminé », qui signifie que les produits radioactifs sont collés à la peau ou ingérés. Les vecteurs de contamination sont l'air, l'eau ou les aliments. Lorsqu'il y a un accident nucléaire catastrophique (Tchernobyl) ou moins grave et plus récent (Fukushima), ou encore plus dangereux lors des expériences militaires dans l'atmosphère, des éléments radioactifs sont projetés dans l'atmosphère, quelques-uns sous forme gazeuse (le krypton, le

xénon radioactifs, par exemple), mais la plupart sous forme de particules. Les plus grosses particules retombent à proximité du site, mais les plus fines sont entraînées par les vents, et se répandent dans l'atmosphère. Elles peuvent accidentellement rencontrer un nuage, et une partie des particules est alors dissoute dans les gouttes d'eau du nuage, une autre partie est entraînée par le nuage. Dans ces trajets, imputables aux vents ou aux nuages, les poussières et les produits gazeux vont les uns se disperser et les autres tomber. Le plus dangereux, c'est la pluie qui entraîne avec elle beaucoup de poussières et de produits radioactifs dissous. Ils s'incorporent ensuite au sol ou aux eaux naturelles. Certains vont se retrouver ingérés dans les légumes ou dans les animaux. Toutefois, là encore, il faut raison garder. Tout est affaire de doses. Ces « nuages » radioactifs peuvent être dangereux, mais il ne faut pas exagérer. Ainsi, lorsqu'on a ouvert le journal télévisé du 21 mars 2011 en nous annonçant que le nuage radioactif allait survoler la France, c'était une « alerte » totalement injustifiée. L'irradiation que l'on était susceptible de recevoir était 1 000 ou 10 000 fois moins forte que les doses de radioactivité que l'on reçoit habituellement. Et 10 millions de fois moins forte que ce qu'ont reçu les Polynésiens lors des expériences françaises dans le Pacifique.

**D. de M. : Quelles sont les doses dites « habituelles » ?**

**C. A. :** Je l'ai dit : on parle de 2,4 à 3,5 milli-sievert pour l'irradiation naturelle et on considère que l'irradiation commence à être sérieuse au-delà de 1 000 milli-sievert. La contamination des eaux des rivières ou, plus encore, des nappes phréatiques peut être une source de contamination très sérieuse. Il y a quarante ans, alors qu'on n'était pas très conscient du danger, on rejetait des déchets radioactifs du site de recherche de Pierrelatte directement dans le Rhône ! Aujourd'hui, cela est réglementé très strictement.

**D. de M. : Récemment, à Fukushima, les médias se sont inquiétés de l'importance de la radioactivité de la mer à proximité de la centrale !**

**C. A. :** La contamination de la mer proprement dite est rapidement diluée par la houle et les courants. Ce qui est dangereux c'est de manger des poissons ou des algues de la zone contaminée. Mais on peut éviter cette ingestion. A priori, il ne faut donc pas exagérer. Par exemple, on a parlé de l'iode 131, mais il est désintégré en deux semaines. Le césium 137, ç'aurait pu être plus sérieux car il lui faut quatre-vingts ans pour mourir, mais il y en avait moins. De toute manière, il faut distinguer la pollution radioactive dans la zone désormais évacuée et dans les zones plus lointaines, et ne pas tout mélanger. Ce qu'il faut répéter, c'est qu'il ne faut pas mélanger le danger des radioéléments à vie courte (c'est-à-dire avec des périodes de désintégration de la seconde, de la minute, de l'heure ou même de l'année) et la radioactivité à vie longue (c'est-à-dire dix ans, cent ans, des milliers d'années, voire des

centaines de milliers d'années). Les radioéléments à vie courte meurent très vite et, sauf irradiation massive, ne sont pas trop dangereux. Il suffit de les entreposer dans un lieu isolé, en les laissant mourir. Les radioactivités à vie longue sont beaucoup plus dangereuses. Exemple : si l'on contamine une nappe phréatique par du césium 137, du strontium 90 ou du baryum 137, elle sera toujours radioactive cinquante ans après. Si c'est par le technétium 99 ou l'antimoine 126, il faudra même évaluer la contamination en milliers d'années. Les émissions de produits radioactifs dans l'environnement ont deux sources potentielles : les accidents des centrales nucléaires et les déchets produits par ces centrales.

**D. de M. : Et les expériences à des fins militaires ?**

**C. A. :** Elles sont désormais interdites par un traité international. Toutes les expérimentations sont interdites.

**D. de M. : Pourtant, la Corée vient encore récemment de se livrer à ce type d'expériences.**

**C. A. :** Il s'agit là de ce que les Américains appellent les « pays voyous » qui violent les traités et essaient de se doter d'un arsenal nucléaire. La question des déchets des centrales est, elle, d'une autre ampleur.

**D. de M. : Vous insistez beaucoup là-dessus. Que voulez-vous dire ?**

**C. A. :** On produit en France un kilo de déchets radioactifs par habitant et par an, ce qui fait tout de même soixante mille tonnes. Dans ces déchets, il faut distinguer ceux qui sont à courte période et donc qui s'éteignent très vite – si on n'est pas en contact direct avec eux, ils ne sont pas dangereux – et ceux qui ont une longue période, qui se désintègrent lentement. Ceux-là sont dangereux. Un combustible habituel des centrales classiques considéré comme usé, c'est-à-dire ayant fonctionné pendant trois ans dans une centrale, contient 95 % d'uranium, dont encore 0,9 % d'uranium 235, 5 % de déchets radioactifs, soit 1 % de plutonium, 3,63 % de produits de fission et 0,09 % d'actinides mineurs. Que faire de ces déchets ? Deux voies sont utilisées dans le monde : celle du retraitement – c'est la voie française – et celle du non-retraitement : c'est la voie américaine.

**D. de M. : Pourquoi cette dichotomie ?**

**C. A. :** Parce que les Américains sont très sensibilisés par les questions de dissémination du plutonium. Si on laisse le plutonium dilué dans l'uranium, il ne peut être ni récupéré, ni utilisé. On entrepose donc les déchets tels quels, et on les laisse mourir. La solution française, c'est, au contraire, de

laisser refroidir le combustible deux ou trois ans. Pendant ce temps, les éléments radioactifs à vie très courte sont morts. Puis on retraite le combustible utilisé pour en séparer le plutonium d'un côté, les éléments radioactifs de l'autre.

**D. de M. : Et qu'est-ce qu'on en fait après ?**

**C. A. :** Le plutonium est réutilisé en fabriquant un nouveau combustible nucléaire, associant plutonium et uranium enrichi. Cela s'appelle le Mox (un mélange d'oxyde), et c'est fabriqué à Marcoule, dans le Gard. Quant aux déchets, on les retraite à La Hague, et ceux à vie longue sont stockés.

**D. de M. : On les stocke où ?**

**C. A. :** Initialement, on voulait les stocker à grande profondeur (– 2 000 mètres), sceller le tout et ne plus s'en occuper. Avec quelques autres, j'ai lutté contre cette solution, risquée géologiquement et psychologiquement mauvaise.

**D. de M. : Pourquoi dites-vous « mauvaise » ?**

**C. A. :** Parce que c'est physiquement inutile. Supposons que vous ayez 1 gramme d'un isotope radioactif, et que les rayonnements qu'il émet soient arrêtés par une épaisseur de terre de un mètre. Si vous en avez 1 kilo ou 10 kilos, ils seront toujours arrêtés par la même épaisseur de terre de 1 mètre. Il ne sert à rien de l'enterrer à 1 000 ou 10 000 mètres ! Les distances parcourues par les radiations ne s'additionnent pas. Pas plus que dix sprinters ne courent plus vite qu'un seul d'entre eux ! L'idée de l'enfouissement très profond, c'était très largement parce qu'on voulait les enterrer pour ne plus les voir ! C'était le refus de voir le danger, et de le maîtriser. C'est une attitude pour moi irresponsable. Il n'y a aucune industrie, aucune activité humaine qui ne comporte pas une part de risque. Prendre sa voiture le dimanche est un risque beaucoup, beaucoup plus élevé que le nucléaire ! Les risques, on les identifie, et on prend les précautions nécessaires. La solution pour les déchets, adoptée grâce à François Mitterrand et Dominique Strauss-Kahn, alors ministre de l'Industrie, c'est de stocker les déchets en subsurface, avec un accès permanent. On peut ainsi les surveiller et, lorsque la technologie le permettra, les retraiter. Il est, en effet, possible de détruire une partie des déchets en les soumettant à des flux de neutrons rapides. Hubert Curien avait présidé une commission qui avait étudié cette possibilité dans le cadre d'une utilisation éventuelle de Superphénix. L'idée, bien sûr, c'est de détruire les déchets à vie longue.

**D. de M. : Au total, vous pensez quoi de la sécurité des déchets ? On**

## **vous sent partagé...**

**C. A. :** En France, cette question est très surveillée et ne présente pas de danger considérable si on réalise correctement les sites de stockage. Ailleurs, c'est plus compliqué. D'abord, il y a le transport qui n'est pas toujours suffisamment contrôlé. Ensuite, il y a incontestablement des pays qui ne prennent pas les précautions nécessaires. Si le nucléaire est si impopulaire en Allemagne, c'est qu'on a découvert il y a quelques années un site de stockage clandestin, où les matières radioactives étaient disséminées et en contact direct avec le sol et les eaux souterraines. Les images projetées sur les écrans de télévision ont été terribles. Ce que je crains, c'est la dissémination de la filière nucléaire. Autrement dit, que de nouveaux États accédant au nucléaire civil ne prennent pas les indispensables précautions en ce qui concerne le traitement et le stockage des déchets.

### **D. de M. : Quelle solution pour cela ?**

**C. A. :** Renforcer les pouvoirs de contrôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique.

Encore une fois ma crainte ce n'est pas le nucléaire pacifique en France, ce ne sont pas les accidents de centrales modernes – les centrales ex-soviétiques doivent être impérativement reconstruites –, c'est la dissémination du nucléaire militaire mais aussi du nucléaire civil. Lorsqu'on vend du nucléaire civil à l'étranger, il faut s'assurer que le traitement et le stockage des déchets sont convenablement pris en compte !

Je ne suis pas sûr que ce soit toujours le cas.

1- Soddy était le collègue de Rutherford à l'université Mc Gill à Montréal. Il a obtenu le prix Nobel de chimie en 1921.

2- Il est constitué en majorité de protons, mais par interaction avec l'atmosphère ces protons déclenchent des cascades de neutrons beaucoup plus pénétrants.

3- Dari = Dose d'Activité des Rayonnements Internes.

4- Mais il ne faut pas ingérer ces pilules d'iode en période ordinaire car cela risque de perturber le fonctionnement de la thyroïde et de déclencher une hyperthyroïdie.



## **Chapitre 5**

### **Le futur du nucléaire**

**C. A. :** La question du futur du nucléaire doit être posée pour trois raisons de nature très différente. La première, c'est qu'avec la technologie actuelle et si le nucléaire se développe comme semblent le montrer les plans établis par la Chine, l'Inde ou les pays européens, voire arabes, les réserves d'uranium vont s'épuiser aussi vite que le pétrole. En effet, l'uranium 235 qui est le combustible nucléaire ne représente que 0,73 % de l'uranium naturel. 99 % de cet uranium naturel ne sert pas lors des processus de fission. Les réserves évaluées au rythme actuel vont de quatre-vingts à cent cinquante ans. Avec l'accélération de l'usage du nucléaire elles vont devenir beaucoup plus courtes ! La deuxième concerne les déchets. Si le nucléaire se développe, la quantité de déchets va devenir considérable et leur dangerosité globale va augmenter. Or cette question est aujourd'hui mal résolue, il faut développer des filières nouvelles qui produisent moins de déchets et moins dangereux. La troisième raison concerne la dissémination. On va avoir du plutonium partout, des experts en nucléaire partout et le danger terroriste va augmenter.

**D. de M. :** Quelle doit être la stratégie ?

**C. A. :** À mon avis, passer à d'autres technologies.

**D. de M. :** Lesquelles ?

**C. A. :** D'abord celle des neutrons rapides, ce qu'on appelle les surgénérateurs. Dans cette filière, on utilise 99 % de l'uranium naturel.

**D. de M. :** Vous voulez revenir à Superphénix ? Pourtant, vous étiez ministre chargé de la technologie lorsqu'on l'a arrêté.

**C. A. :** Tout le monde a considéré que c'étaient les conditions de l'accord que nous, socialistes, avions passé avec les Verts.

**D. de M. :** Et ce n'était pas vrai ?

**C. A. :** Bien sûr. Mais pour nous, c'était du tout gagnant, car nous pensions – et moi le premier – que Superphénix était une erreur sur le plan technique et un gouffre sur le plan financier ! Lorsque les Verts, en l'occurrence Dominique Voynet, ont proposé la formule « sortir du nucléaire », comme l'accord que les Verts allemands étaient en train de négocier avec le SPD, Lionel Jospin a refusé net, montrant par là qu'il était un homme d'État, ne sacrifiant pas les intérêts de la France à un accord électoral.

**D. de M. : L'arrêt de Superphénix a été un compromis ?**

**C. A. :** Non, c'était pour nous une aubaine. Et pour bien montrer que nous n'étions opposés ni au nucléaire, ni à la technique du surgénérateur, on a décidé de remettre en fonctionnement un autre surgénérateur, Phénix !

**D. de M. : Mais pourquoi y avait-il une telle différence entre Phénix et Superphénix ? C'est pourtant le même principe.**

**C. A. :** Oui, mais pas la même taille. Les effets d'échelle rendent impossible le contrôle de certaines technologies. L'effet de taille n'est pas toujours positif. Pourquoi fait-on des avions de 300 places, voire 800, mais pas de 5 000 places ? C'est bien l'erreur qui a été faite par un célèbre ingénieur du CEA qui a voulu à toute force construire Superphénix avant sa retraite, alors que l'on savait que beaucoup de problèmes n'étaient pas résolus.

**D. de M. : Mais qu'est-ce au juste un surgénérateur ?**

**C. A. :** On utilise comme combustible de fission non pas l'uranium, mais le plutonium 239. L'astuce, c'est qu'on produit ce plutonium à partir d'une suite de réactions nucléaires qui part de l'uranium, mais l'isotope 238. Celui qui constitue 99 % de l'uranium naturel, celui qu'on extrait des minerais d'uranium. L'uranium 238 bombardé par des neutrons donne de l'uranium 239 qui, lui, se désintègre en neptunium 239 et finalement produit le plutonium 239. Mais ce qui est intéressant, c'est que ces réactions peuvent être produites directement par les neutrons produits par la fission du plutonium 239. Ainsi – grosse astuce – à l'aide de l'uranium naturel on produit le combustible nucléaire. Plus besoin d'enrichissement. On ne produit plus de plutonium parmi les déchets, puisqu'on le brûle ! On fait donc d'une pierre deux coups. On multiplie les réserves d'uranium utile par cent (ce qui fait un ou deux millénaires) et on réduit l'activité des déchets.

**D. de M. : Mais pourquoi ne met-on pas cette technologie en route immédiatement ?**

**C. A. :** Parce qu'il y a un *hic*. Le *hic*, c'est la transmission de chaleur pour chauffer le circuit secondaire. L'eau n'est pas utilisable car elle ralentirait les neutrons. Or ici on veut des neutrons rapides. Il faut trouver un transporteur de chaleur qui résiste aux hautes températures et transmette bien la chaleur. Le choix dans Phénix s'est porté sur le sodium liquide (les Russes ont utilisé du plomb fondu mais ce n'est pas mieux). Or ce sodium liquide est très corrosif et très dangereux. Ce fut l'un des problèmes essentiels de Superphénix, où l'on n'est pas parvenu à éviter qu'il ne fasse des dégâts dans les enveloppes. À l'échelle de Phénix, on le contrôle assez bien, mais cela reste dangereux. Et la question du refroidissement et de la sécurité de ce refroidissement est un problème sérieux. Par exemple, en cas d'accident, il est impossible d'arroser le réacteur pour le refroidir, car mis en présence d'eau, le sodium explose. C'est même une expérience type qu'on fait (la fait-on toujours ?) au lycée en classe de chimie. L'avantage, c'est que pour une même masse de combustible, l'énergie produite est considérable. De plus, on peut utiliser ces réacteurs à neutrons rapides pour détruire une partie des déchets radioactifs.

**D. de M. : Mais on va avancer dans cette direction ?**

**C. A. :** Oui, je crois que dans le grand emprunt qu'a lancé Nicolas Sarkozy, on a mis une certaine somme d'argent pour ce développement. Mais il y a une perspective plus lointaine, une autre option, c'est le réacteur à thorium. Cette option est défendue par le prix Nobel de physique italien Carlo Rubbia.

**D. de M. : De quoi s'agit-il ?**

**C. A. :** Le thorium est un élément chimique naturel souvent associé dans les formations géologiques à l'uranium, mais quatre fois plus abondant que lui. Le principe du réacteur à thorium est un peu analogue au surgénérateur. Le produit de fission, c'est cette fois un isotope artificiel de l'uranium, l'uranium 233. On le produit par des réactions nucléaires en cascade à partir du thorium, puis on le brûle. Le grand avantage de ce type de réacteur, dont on n'a pas encore construit de prototype, c'est qu'il produirait peu de déchets et qu'on contrôle parfaitement le flux des neutrons. Le calcul indique qu'après trois cents ans la radioactivité des déchets serait 10 000 fois inférieure à nos centrales actuelles.

**D. de M. : Et la fusion ? La France a beaucoup investi avec le projet ITER<sup>1</sup> à Cadarache.**

**C. A. :** C'est une splendide idée. Avoir le soleil à la maison, sans déchets et avec une production d'énergie infinie. Qui serait contre ? Malheureusement

pour l'instant, c'est une idée totalement chimérique. C'est un projet pour le siècle prochain.

**D. de M. : D'habitude, lorsqu'il s'agit de projets scientifiques audacieux, vous voyez cela de manière optimiste. Là, vous êtes farouchement négatif.**

**C. A. :** Cela vous prouve que je ne fais partie d'aucun lobby, fût-il intellectuel, et que je reste un homme intellectuellement libre. J'essaie de juger au cas par cas et je me méfie des lobbies qui aujourd'hui sont devenus une méthode qui a pignon sur rue.

**D. de M. : Rappelez-nous le principe de la fusion.**

**C. A. :** La fission c'est casser un noyau en deux ; la fusion c'est l'inverse. La fusion nucléaire, c'est l'addition de deux noyaux atomiques pour en fabriquer un troisième, plus lourd. Le processus demande une énorme énergie pour être enclenché, mais en dégage une beaucoup plus gigantesque une fois réalisé. La majorité des étoiles fonctionnent ainsi, et en particulier notre Soleil. Le Soleil est en effet un gigantesque réacteur nucléaire. Là, deux atomes d'hydrogène lourds se fusionnent pour fabriquer de l'hélium en dégageant une quantité énorme, gigantesque d'énergie. Cette énergie est dissipée sous forme de lumière et est donc à l'origine de toute la vie, nous... vous ! C'est à partir de ce type de réaction qu'on a fabriqué la bombe H. Dans cette bombe terrifiante, on utilise une bombe à fission de plutonium comme détonateur pour provoquer la fusion des noyaux de deutérium (isotope 2 de l'hydrogène) et de tritium (isotope 3 de l'hydrogène). Au total, on fusionne deux atomes d'hydrogène plus deux neutrons pour fabriquer deux atomes d'hélium. Les États-Unis ont fait exploser une telle bombe appelée thermonucléaire dans l'atoll d'Eniwetok le 1<sup>er</sup> novembre 1952. Les Soviétiques se sont bien sûr lancés dans l'aventure et ont fait exploser, en 1961, une bombe à hydrogène correspondant à 4 000 bombes d'Hiroshima. Mais pour les nucléaristes pacifiques, l'idée depuis lors a été la même, lancinante, obsédante : comment apprivoiser une telle réaction terrifiante pour en faire un réacteur produisant de l'électricité ? Si on savait faire un tel réacteur, il serait à ressource inépuisable (l'hydrogène), sans déchets (l'eau) ! Le rêve, quoi. Seuls des neutrons seraient émis et sans dissémination de plutonium.

**D. de M. : Oui, cela semble merveilleux.**

**C. A. :** Oui, c'est le soleil domestique. Le rêve de tout un chacun. Malheureusement, depuis quarante ans, on s'est cassé le nez. Le défi n'est pas mince. Il faut porter le mélange réactionnel à 100 millions de degrés pour

amorcer la réaction. Comment faire ? Aucun matériau, aucune enceinte ne résiste à une telle température ! L'idée est de « suspendre » le mélange réactif en l'ionisant et en faisant agir plusieurs champs magnétiques. Ce dispositif est appelé Tokamak. Il n'a jamais fonctionné. On s'obstine. Sans avoir véritablement de nouvelles idées. Ce projet a commencé il y a quarante ans et les Américains en finançaient plus de la moitié. Aujourd'hui, ils ne mettent que 3 % du financement.

**D. de M. : Vous n'y croyez pas ?**

**C. A. :** Je crois que ce projet est pour la fin du siècle. Or nos ressources financières sont limitées. Financer ITER, c'est réduire les financements pour la mise au point de la quatrième ou cinquième génération de centrales, qui, elles, sont à portée de main. Je suis assez exaspéré par le lobbying de la physique du plasma qui a réussi à faire passer ce projet avec des arguments fallacieux : « Ce n'est pas dangereux ; c'est l'énergie inépuisable du Soleil », etc. Or l'expérimentation sera dangereuse, plus dangereuse que le fonctionnement d'une centrale. Pour ne citer qu'un exemple, on émettrait un flux intense de neutrons à 14 Mev qui provoquerait des réactions nucléaires dans les enceintes de la chambre de réaction. En fait de réacteur sécurisé, on fait mieux. Et le prix ne cesse d'augmenter : 3 milliards d'euros au début, on parle aujourd'hui de 9 milliards. Oui, ce projet ne me paraît pas raisonnable. La décision de le construire est une fantaisie de Jacques Chirac, comme d'inscrire le principe de précaution dans la Constitution. Décisions d'ailleurs totalement contradictoires.

**D. de M. : Dans tout ce panorama, vous ne m'avez pas parlé de l'EPR.**

**C. A. :** Parce que, pour moi, l'EPR n'est pas un nouveau réacteur, c'est un réacteur classique à uranium 235 modernisé et sécurisé. Pour moi, c'est un excellent réacteur de transition entre les centrales actuelles et ce que sera la quatrième ou cinquième génération.

**D. de M. : Mais on a du mal à le vendre.**

**C. A. :** Peut-être, ce n'est pas de mon ressort. Je note qu'on a fait sans doute une erreur de construire le premier réacteur en Finlande où les conditions climatiques sont difficiles. Mais je voudrais revenir sur – ou plutôt engager – le fond du débat. Pourquoi le nucléaire suscite-t-il autant de méfiance et de réticence ?

**D. de M. : Parce qu'il est dangereux, ou parce que les gens le perçoivent comme tel.**

**C. A. :** Non, il n'est pas dangereux, il est même très sécurisé par rapport aux réacteurs usuels ou d'autres grands ensembles industriels. Mais aujourd'hui, le principal problème, c'est de regagner la confiance des populations. Or, si comme je le pense, l'énergie produite par la filière nucléaire en France est l'une des industries les plus sûres (il suffit de comptabiliser le nombre de morts en un demi-siècle et de les comparer aux autres activités humaines, y compris le tourisme !), son développement passe désormais par son acceptation par le public. Et il ne faudrait pas tout confondre. Le danger nucléaire c'est d'abord le nucléaire militaire, la prolifération, y compris celle des déchets des bombes.

**D. de M. : Oui, tout le monde en est conscient.**

**C. A. :** De certains aspects, oui. Le fait qu'aujourd'hui sans doute près de dix pays possèdent l'arme nucléaire n'est pas rassurant. Mais ce n'est pas de cela dont je voulais parler. Les risques de dissémination sont considérables. On a signé des traités de désarmement. C'est bien. Mais qu'a-t-on fait des matériaux fissiles ? On estime qu'en ce qui concerne l'uranium hautement enrichi, les Russes en possèdent entre 1 000 et 1 500 tonnes ; de quoi faire 60 000 bombes. Pour le plutonium, il s'agirait de 50 tonnes, permettant de réaliser 10 000 bombes. Bien sûr, réaliser une bombe puissante et de taille manipulable (15 kilos pour une bombe à uranium enrichi, 4 kilos pour une bombe à plutonium) demande une technicité qui n'est pas à la portée du premier venu. Mais les méthodes pour fabriquer des bombes sont connues de nombreux ingénieurs. Lorsqu'on constate que parmi ceux qui ont préparé les attentats du World Trade Center il y avait des ingénieurs diplômés et tout et tout, il y a lieu de s'inquiéter. Nelson Mandela, lorsqu'il est devenu président, a constaté que l'Afrique du Sud possédait du combustible enrichi et s'appêtait à fabriquer une bombe. Il a fait diluer le combustible et a arrêté le programme ! Combien de dirigeants ont la sagesse de Mandela ?

**D. de M. : Et alors, il n'y a pas de solution ?**

**C. A. :** Si, bien sûr. C'est d'abord de diluer les stocks d'uranium enrichi avec de l'uranium naturel. En s'y prenant bien, on pourrait fabriquer des quantités d'uranium enrichi à 4 % pour les centrales nucléaires<sup>2</sup>, le plutonium peut être utilisé pour fabriquer du Mox. Mais tout devrait être contrôlé par une instance internationale, comme Georges Charpak et Richard Garwin l'ont proposé. En fait, voilà un sujet sur lequel le G 20 devrait se pencher car ce problème relève de la communauté internationale.

**D. de M. : Mais je croyais que c'était contrôlé par l'Agence internationale de l'énergie atomique.**

**C. A. :** En principe c'est vrai. Mais on a vu la difficulté qu'elle a eue pour inspecter en Irak, en Iran et même récemment au Japon. On ne les a pas autorisés à aller sur place vérifier dès le premier jour. C'est bien de cela dont il s'agit : il faut renforcer les pouvoirs et les moyens de l'AIEA. Elle doit être autorisée à contrôler toutes les installations nucléaires centrales, comme le stockage des déchets. Elle doit avoir pour mission d'établir tous les ans un rapport public faisant état de la situation : état des centrales, état des sites de stockage, sécurité du transport, sécurité des usines de retraitement. Quand je dis sécurité, je pense aussi bien à la protection des populations civiles qu'à la sécurité militaire. Par exemple, les usines qui fabriquent le Mox sont-elles protégées contre une éventuelle attaque terroriste voulant se procurer du plutonium 239 ?

**D. de M. :** Cela est-il compatible avec la transparence que vous prônez ?

**C. A. :** Je le crois. La transparence doit être organisée en tenant compte de ces exigences de sécurité ! Transparence ne veut pas dire négligence. Les journalistes, les députés ou les citoyens français ne sont pas des apprentis terroristes !

1- International Thermonuclear Experimental Reactor.

2- En cumulant les stocks américains et soviétiques, on pourrait fabriquer 100 000 tonnes de combustibles pour les centrales à uranium enrichi.

# Chapitre 6

## La politique de l'Énergie

**C. A. :** Depuis que l'Homme a découvert le feu, il n'a cessé de chercher à améliorer ses ressources en énergie. L'Homme est de plus en plus gourmand en énergie. Entre 1900 et 2000, la population mondiale a été multipliée par 3,5, la consommation d'énergie a été multipliée par 10. La population mondiale augmentant de 200 000 personnes chaque jour, il y a tout lieu de penser que ses besoins en énergie ne vont pas diminuer ! En même temps, nos ressources en énergies classiques s'épuisent.

**D. de M. :** À quel rythme ?

**C. A. :** Au rythme de notre consommation effrénée !

Faisons un point rapide. La répartition des sources d'énergie à l'échelle mondiale est 36 % de pétrole, 21 % de gaz naturel, 23 % de charbon, donc les combustibles fossiles représentent 80 %. L'énergie hydraulique et un peu de géothermie 13 %, le nucléaire 7 %.

Pour la France, la situation est différente. Le pétrole représente 37 %, le gaz naturel 14 %, le charbon 7 %, le nucléaire 32 % et l'énergie hydraulique 10 %.

**D. de M. :** Mais à quoi est utilisée cette énergie ?

**C. A. :** Vous avez raison de poser la question car on ne peut pas utiliser n'importe quoi à n'importe quoi.

En gros, sans entrer dans le détail des chiffres et pour fixer les idées, 45 % est utilisé pour le chauffage des immeubles et usages industriels, le reste partagé à peu près également entre transports 30 % et électricité 25 %.

Ces chiffres varient bien sûr suivant les pays avec le climat, le degré de développement, etc., mais s'il ne faut pas les prendre au pied de la lettre, ils permettent de fixer les idées et de raisonner.

**D. de M. :** Quelles sont les propositions des écologistes en matière de politique de l'énergie ?



**C. A. :** Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> qui d'après eux ont une influence désastreuse sur le climat, on va diviser la consommation de combustibles fossiles par deux. On supprime le nucléaire. Un tel scénario ferait chuter notre consommation d'énergie de 50 %. C'est cohérent avec le schéma de la décroissance de Serge Latouche !

C'est diminuer le niveau de vie des Français d'un facteur deux. Le programme c'est : nous nous sommes goinfrés, nos enfants doivent vivre d'une manière frugale, comme l'exprime sans vergogne le député Yves Cochet.

La philosophie des écologistes, c'est : arrêtons le progrès, il est nocif. Revenons en arrière. Il y a une différence de niveau de vie avec les pays sous-développés ? Il suffit de diminuer le nôtre pour diminuer l'injustice. C'est la fameuse phrase d'Yves Cochet : « Un Français vaut dix Congolais. » Conclusion : il ne faut pas limiter les naissances au Congo, mais en France. Car le Français pollue plus et consomme plus ! On marche sur la tête.

**D. de M. :** Certains, moins radicaux, proposent de remplacer ces énergies par des énergies alternatives : l'éolien, le photovoltaïque, la géothermie, les biocarburants.

**C. A. :** Le résultat est tout aussi irréaliste.

Supposons que l'on veuille sortir du nucléaire comme le proposent les Verts et le remplacer par les énergies alternatives.

La production annuelle d'électricité en France, c'est 390 térawatts-heure<sup>1</sup>.

Actuellement, les deux mille éoliennes implantées fournissent 8 térawatts-heure. Il faudrait planter cent mille éoliennes ! Cela nous assure à coup sûr la révolution ! Et la belle France défigurée.

**D. de M. :** Et le photovoltaïque ?

**C. A. :** Pour produire une quantité d'électricité (qui serait deux fois plus chère) équivalente, il faudrait couvrir la surface d'un grand département français par des panneaux photovoltaïques. Là encore, je doute que ce soit accepté.

Mais même si on réalisait ces deux programmes, on ne pourrait pas gérer les besoins d'électricité de notre pays, comme l'explique très bien Jean-Marc Jancovici.

Car dans les questions concernant l'énergie il y a un problème qu'on a mal résolu, c'est le stockage de l'énergie. Certes, pour des faibles quantités il y a les batteries, pour les quantités supérieures on stocke de l'eau en hauteur pour recycler l'énergie lors de sa chute, mais ces méthodes sont à faible rendement.

Alors, que ferait-on lorsqu'il n'y aurait pas de vent pour l'éolien ou pas

de soleil pour le photovoltaïque ? EDF a déjà beaucoup de mal à réguler la production en fonction des besoins. Là, ce serait le désastre. On vivrait la moitié du temps dans le noir et, en fonction des fluctuations du mistral, le TGV Paris-Marseille s'arrêterait de temps à autre : « Panne de mistral ! Arrêt buffet ! »

### **D. de M. : Et l'hydraulique ?**

**C. A. :** Ce fut la source d'énergie n° 1 en France jusqu'au nucléaire. Nous produisons 6 térawatts-heure par cette voie. Pour produire toute l'électricité par ce moyen, nous aurions besoin de multiplier par 65 le nombre de barrages actuel. Ou alors de construire comme les Chinois quantité de barrages gigantesques comme celui des Trois Gorges qui produira 100 térawatts-heure !

Cela conduirait à dévaster toutes les vallées des Alpes, des Pyrénées, du Jura, et encore on n'est pas sûr d'y parvenir. De plus, comme vous le savez, les écologistes n'aiment pas les barrages. L'hydraulique a un avenir certain en Afrique de l'Ouest, en Inde du Nord et en Amérique du Sud. En France, son développement sera plus limité.

### **D. de M. : Mais les Allemands, eux, ont décidé de sortir du nucléaire ?**

**C. A. :** Oui, c'est la décision la plus stupide qu'ils aient jamais prise. Pour appliquer cette décision, ils développent à tout-va les centrales à lignite qui non seulement émettent beaucoup de CO<sub>2</sub> mais aussi injectent dans l'atmosphère du soufre et une grande quantité de particules. Les Allemands parlent beaucoup de limiter les émissions de CO<sub>2</sub>, ils organisent des colloques, des pétitions mais ce sont eux les plus grands émetteurs de CO<sub>2</sub> en Europe ! Daniel Cohn-Bendit devrait être plus actif en Allemagne !

### **D. de M. : Et les biocarburants ?**

**C. A. :** Ils peuvent être une source intéressante d'énergie complémentaire à condition qu'ils ne se développent pas au détriment de l'agriculture alimentaire.

Or, il faudrait leur consacrer des surfaces agricoles gigantesques pour satisfaire nos besoins en électricité.

Mais on peut aussi faire le raisonnement inverse et dire : arrêtons le nucléaire et produisons tout grâce au pétrole et au gaz. Avec un baril à 100 dollars (c'est à mon avis un minimum pour le futur), la facture énergétique s'accroîtrait de 100 milliards d'euros par an ! Alors qu'actuellement nous payons l'électricité 40 % moins cher que le reste de l'Europe !

**D. de M. : Mais il y a la question de la sécurité. Avec ces accidents de centrale, Three Mile Island, Tchernobyl, plus récemment Fukushima, les gens ne sont pas rassurés. Et on les comprend !**

**C. A. :** Là encore, il ne faut pas se laisser guider par le subjectif ni le catastrophisme des médias, mais se fier aux faits.

L'énergie nucléaire en France a sans aucun doute tué beaucoup moins de monde que toutes les autres industries. Le risque nucléaire pour un Français est infiniment moindre que celui de prendre l'avion ou de prendre sa voiture un week-end !

À l'échelle du globe, le charbon a tué beaucoup plus de monde que le nucléaire (Hiroshima et Nagasaki compris !). Mon grand-père qui était mineur est une victime de la mine. Il est mort à moins de soixante-dix ans, victime d'une silicose. On ne l'a jamais comptabilisé dans aucune statistique avec tous les morts de la même cause. Les morts par le nucléaire, Tchernobyl compris, sont très peu nombreux par rapport à ceux dus aux cyclones, aux inondations, aux séismes, aux tsunamis ou autres éruptions volcaniques !

Et si on veut s'en tenir au seul nucléaire, le nucléaire militaire expérimental a tué beaucoup, beaucoup plus de monde que les accidents du nucléaire pacifique !

**D. de M. : Mais alors, si le nucléaire est le moyen le plus économique et le plus producteur, faut-il aller vers le tout nucléaire ?**

**C. A. :** Pas davantage. La tendance en France a toujours été de rechercher l'unicité des solutions. Hier **LA** solution pour l'électricité c'était les barrages, aujourd'hui c'est **LE** nucléaire.

Je crois pour ma part que l'évolution va se dessiner dans deux directions : la multiplicité des sources d'énergie et la déconcentration des productions d'énergie.

De toute manière, il va falloir économiser l'énergie si l'on veut partager un peu mieux nos richesses avec les pays émergents d'aujourd'hui et de demain.

La première action à mener est en direction du chauffage, des immeubles d'habitation et industriel. Nous dépensons 45 % de notre énergie de cette manière et avec des rendements très faibles, 15-20 %.

**D. de M. : Comment faites-vous ?**

**C. A. :** Les solutions sont connues.

D'abord bien sûr l'isolation (doubles fenêtres, calfeutrages), ensuite associer de petits ordinateurs qui coupent automatiquement courant et chauffage lorsqu'on n'en a pas besoin, et puis les énergies nouvelles. La

géothermie basse énergie et le photovoltaïque. La géothermie est scandaleusement sous-développée en France alors qu'elle est en expansion dans le monde. Elle pourrait être utilisée dans toutes les régions françaises. Il ne s'agit pas de fabriquer de l'électricité comme on peut le faire dans les régions volcaniques en Islande, en Nouvelle-Zélande ou en Guadeloupe, mais d'utiliser de l'eau à 60 ou 80 °C pour chauffer les immeubles ou les locaux commerciaux. Il y a des réserves potentielles pratiquement partout.

**D. de M. : Mais vous parlez du photovoltaïque, je croyais que vous y étiez hostile ?**

**C. A. :** Bien sûr que non ! Je suis contre lorsqu'il s'agit de remplacer les centrales nucléaires par des champs de panneaux solaires. Mais à l'échelle d'une maison ou d'un immeuble, c'est un chauffage d'appoint très intéressant, surtout si l'on stocke l'énergie produite dans la journée dans des batteries pour utiliser l'électricité la nuit.

Aujourd'hui le photovoltaïque est cher, trop cher, près de deux fois le prix de l'électricité nucléaire, mais des progrès importants sont en cours et le prix va baisser. C'est une source d'énergie d'avenir mais en énergie distribuée, pas en mode concentré. Bien sûr, on utilisera aussi un peu de chauffage au bois pour les habitations dans les régions septentrionales.

**D. de M. : Mais ça ne résout pas tout le problème de l'énergie !**

**C. A. :** Non, bien sûr, surtout l'énergie utilisée dans les transports, l'énergie mobile.

L'électricité va à mon avis dans l'avenir y jouer un rôle important. Car je ne doute pas du succès de la voiture électrique en ville et de la voiture hybride sur les longues distances. Mais à une échéance de quinze ans. Cette électricité, nécessaire pour recharger les batteries, sera en France d'origine nucléaire pour l'essentiel avec une petite addition d'éolien.

**D. de M. : Et le biocarburant ?**

**C. A. :** Je crois qu'il sera à terme réservé aux avions dont on voit difficilement comment ils pourraient, dans les vingt ans prochains, se passer d'un combustible de type kérosène. Au total, à mon avis le nucléaire va rester essentiel mais peut-être sous une autre forme.

**D. de M. : Que voulez-vous dire ?**

**C. A. :** Actuellement, l'électricité nucléaire signifie grosses centrales distribuant l'électricité à une quantité énorme de clients.

Et les économistes vous diront que plus la centrale est grosse plus on

minimise l'investissement par rapport à l'électricité produite. C'est ce qu'on appelle l'effet d'échelle. Cela conduit à multiplier les grosses centrales. Ce raisonnement est économiquement valable, mais d'un point de vue technologique et psychologique ne tient pas !

**D. de M. : Pourquoi ?**

**C. A. :** Parce qu'il est beaucoup plus difficile de contrôler un gros réacteur qu'un petit. Phénix n'a jamais posé de problème, Superphénix a été incontrôlable !

Et si vous considérez la question du refroidissement, il est facile de comprendre qu'une petite centrale est beaucoup plus facile à refroidir qu'une grosse centrale.

**D. de M. : On le comprend. Mais existe-il de petites centrales nucléaires ?**

**C. A. :** Oui, les moteurs des sous-marins nucléaires, par exemple.

Par parenthèse, ce seront les moteurs des futurs gros bateaux dans un futur pas très lointain.

Je crois que les petits réacteurs sont l'une des composantes de la future politique de l'avenir. Par exemple, on associera dans une ville donnée un petit réacteur nucléaire, un peu d'éolien, un peu de géothermie, peut-être aussi un peu de biocarburant, et on jouera sur chaque touche du piano. Il y aura des programmes d'ordinateur qui coordonneront l'usage des diverses sources d'énergie ! Bill Gates qui en matière d'investissement n'est pas sans intuition vient d'investir dans les petits réacteurs nucléaires !

**D. de M. : Et les combustibles fossiles ?**

**C. A. :** Ils n'ont pas dit leur dernier mot, bien sûr. Ils vont même rester la source d'énergie dominante pour les vingt prochaines années.

**D. de M. : Mais les réserves s'épuisent ?**

**C. A. :** Moins vite qu'on ne le pensait. On a découvert des réserves de pétrole gigantesques off shore au Brésil et à terme en Sibérie, et puis il y a les sources d'énergie nouvelles, les gaz de schiste et les grès bitumeux.

Les gaz de schiste représentent déjà 20 % de la consommation énergétique des États-Unis et d'après les estimations donnent désormais à ce pays une autonomie énergétique d'un siècle.

**D. de M. : Pourtant en France ces gaz de schiste rencontrent une grande hostilité des populations ?**

**C. A. :** C'est vrai, d'autant plus que Total a eu la finesse de commencer l'exploration à 20 kilomètres de la ferme de José Bové ! Plus sérieusement, c'est que de nombreux problèmes devront être résolus. Si on ne change pas le code minier et qu'on ne donne pas au propriétaire du sol un pourcentage sur les revenus du sous-sol, la prospection de ces nouvelles sources d'énergie sera impossible. De toute manière, on ne pourra pas exploiter les gaz de schiste en Europe comme on le fait aux États-Unis.

**D. de M. : Comment opère-t-on là-bas ?**

**C. A. :** Peut-être faut-il dire un mot de ce que sont les gaz de schiste.

Les schistes sont avec les calcaires les roches sédimentaires les plus abondantes.

Ce sont d'anciens dépôts d'argile marin qui ont été cuits par un phénomène géologique qu'on appelle le métamorphisme.

Au cours de ce chauffage, la matière organique que contiennent ces schistes s'est transformée en petites inclusions gazeuses dispersées dans le schiste.

Pour récupérer ce gaz, on réalise un forage horizontal, puis on fracture les roches en injectant un fluide constitué par de l'eau et des agents chimiques corrosifs. Cette fracturation qu'on appelle hydraulique permet la libération des gaz qu'on récupère à la surface.

**D. de M. : C'est ce qui provoque des protestations énergiques des populations !**

**C. A. :** Pour l'instant, en France, on n'en est pas à l'exploitation mais à la prospection. Mais on a peur de la suite. En effet, les méthodes d'exploitation consomment énormément d'eau. Et la partie d'eau que l'on rejette est une eau polluée remplie d'acides, qui peut produire des désastres écologiques dans les rivières. Il faut édicter des règles strictes sur la qualité de l'eau et des limites sur les quantités utilisées.

En Europe, les réserves sont peut-être considérables, équivalentes à celles des États-Unis, mais pour que l'exploitation et l'exploration se développent, il va falloir fixer des règles strictes de protection de l'environnement et s'assurer qu'elles sont appliquées.

**D. de M. : C'est pour l'instant d'une grande confusion ?**

**C. A. :** Là encore on n'a rien préparé, rien expliqué. On a délivré des permis de recherche sans savoir de quoi il s'agissait. Il faut que les compagnies industrielles comprennent que les temps ont changé et que les populations ne veulent plus accepter n'importe quoi !

Mais j'ai voulu vous parler des gaz de schiste parce que c'est un exemple de l'extraordinaire développement que connaît la prospection de nouveaux combustibles fossiles.

Les réserves de charbon sont considérables : nous avons sans doute deux siècles de réserves, en particulier en Chine, en Inde, aux États-Unis en Russie, en Afrique (et pas seulement du Sud). Les réserves de gaz naturel sont aussi considérables. Quant au pétrole, nous avons évoqué les découvertes récentes.

Les combustibles fossiles vont donc à mon avis continuer à dominer le secteur de l'énergie dans les vingt ou trente prochaines années.

**D. de M. : Mais alors, les gaz à effet de serre, le CO<sub>2</sub> et le climat ? Copenhague ? Tout cela n'a servi à rien ?**

**C. A. :** Vous avez dit Copenhague ?

Vous êtes bien placé<sup>2</sup> pour savoir que, d'une part, j'ai des doutes sur l'influence exacte du CO<sub>2</sub> sur le climat, cependant je ne suis pas partisan des dégagements excessifs de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère car ils acidifient l'océan.

Je ne me réjouis donc pas de la situation actuelle, même si mes opinions sur le climat progressent à grands pas et que j'avais hélas prévu cette évolution. Pour ma part, je continue à travailler sur la capture et la séquestration du CO<sub>2</sub> dans les formations géologiques, car je crois que c'est une bonne solution de compromis qui permet d'utiliser les combustibles fossiles tout en minimisant les dégagements de CO<sub>2</sub>.

**D. de M. : Cela consiste en quoi, exactement ?**

**C. A. :** On capture les gaz qui sortent d'une centrale à charbon, pétrole ou gaz, on isole le CO<sub>2</sub> puis on le réinjecte dans le sous-sol où il finit par rester, notamment s'il est injecté dans un aquifère. Il se transforme alors en bicarbonate et finalement précipite sous forme de carbonate de calcium, autrement dit de calcaire.

Je crois beaucoup à cette technique qui rassurerait tout le monde. Malheureusement, avec la baisse des exigences sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> j'ai peur que tout cela ne s'arrête ! Ce serait véritablement regrettable.

**D. de M. : Et l'hydrogène ? On nous avait dit qu'après la civilisation du carbone allait s'ouvrir l'ère de l'hydrogène, où en est-on ?**

**C. A. :** C'est, je le crois, l'énergie de l'avenir.

L'idée, c'est de provoquer la création de la molécule d'eau H<sub>2</sub>O à partir de ses deux gaz constituants, l'hydrogène H<sub>2</sub> et l'oxygène O. On réalise cette reconstitution dans une pile qui génère donc un puissant courant électrique.

Aujourd'hui on maîtrise parfaitement cette technique. Il y a des voitures, des camions prototypes qui roulent avec des moteurs électriques alimentés par

des piles à hydrogène.

**D. de M. : Alors pourquoi ne passe-t-on pas directement à cette technique qui, à vous écouter, paraît efficace et n'a comme déchets que de l'eau ?**

**C. A. :** Parce qu'on ne sait pas préparer l'hydrogène et mal le stocker de manière sûre, sans danger.

L'hydrogène est abondant sur Terre, mais combiné avec l'oxygène pour donner de l'eau ou avec le carbone dans des composés organiques. Or, pour faire marcher une pile nous en avons besoin sous forme d'hydrogène.

Comment préparer cet hydrogène ? On connaît de multiples techniques, mais chacune consomme autant d'énergie (ou plus) que n'en produit la pile. C'est par exemple le cas de l'électrolyse de l'eau.

Nous n'en sommes encore qu'aux prémices. Les techniques les plus prometteuses semblent être celles qui utilisent des bactéries à partir de la matière organique. Mais attendons encore un peu.

Par ailleurs, l'hydrogène est l'élément le plus léger et, même à l'état liquide, il occupe un volume important. Comment le stocker dans un volume compatible avec l'encombrement d'un véhicule ?

On peut le comprimer, mais s'il y a une fuite ce peut être dangereux car l'hydrogène réagit avec l'oxygène et cette union est explosive. On ne peut pas construire des voitures qui au moindre accrochage exploseraient. Et puis il y a la question de la distribution de ce qui remplacera (j'emploie le futur) les stations-service ! Comment les alimenter en hydrogène ? Par pipe-line ? Par camions-citernes ?

**D. de M. : Bref, ce n'est pas pour demain ?**

**C. A. :** C'est pour après-demain. À mon avis, on commencera par équiper de moteurs à hydrogène les bateaux de pêche et les camions car, sur ces engins, on pourra stocker l'hydrogène dans de grands réservoirs en toute sécurité.

**D. de M. : Vous voyez, c'est comme le nucléaire, chaque fois qu'on trouve une nouvelle manière de produire de l'énergie, il y a un danger potentiel !**

**C. A. :** C'est inhérent au problème. Lorsqu'on vous raconte pour vous vendre ITER que la fusion nucléaire qui se produit à 100 millions de degrés et produit des neutrons de 14 Mev n'est pas dangereuse, on se moque de vous !

Je crois que ces questions d'énergie doivent être abordées d'une manière nouvelle, plus ouverte. Il faut accepter le risque et dire comment on le maîtrise.



On ne peut pas continuer à laisser les lobbyings s'affronter dans une obscurité totale et avec des arguments d'autorité qui sont en fait de nature politique ou commerciale. D'un autre côté, à l'époque de la mondialisation et d'internet, les citoyens veulent être informés et rassurés. La sécurité nucléaire sera assurée d'abord par la transparence, sinon l'irrationnel déclenchant les peurs finira par la détruire !

En France, le secteur nucléaire est peuplé de scientifiques et d'ingénieurs très compétents. Parmi les plus compétents du monde. Bien plus que les Japonais ou les Allemands, par exemple. Pourtant, il pêche souvent par arrogance et par une volonté de lobbying. Je crois que ces comportements – qui s'atténuent mais persistent – font un grand tort au nucléaire, notamment dans les milieux de la recherche publique. Mais, sur les éoliennes, il en est de même.

On subventionne le développement des éoliennes qui produisent une électricité chère et intermittente, et qui sont fabriquées en Chine. Croyez-vous que sans le lobbying organisé et bien financé des écologistes cette filière aurait pu percer comme elle l'a fait ?

Étrangères, chères et laides, voilà le triptyque des éoliennes. Allons-nous laisser défigurer nos paysages au nom de l'écologie ?

#### **D. de M. : Mais rassurez-vous, il y a des réactions !**

**C. A. :** Oui, et notamment celle du président Giscard d'Estaing lui-même. Et un lobbying anti-éoliennes s'organise<sup>3</sup>. Mais c'est là le « lobbying contre-lobbying ».

L'antidote de tout cela, c'est la transparence. Notre filière nucléaire est, je crois, sûre. Nos centrales sont entretenues et contrôlées, nos usines de retraitement aussi. Pourquoi ne pas montrer les précautions qui y sont prises ? François Mitterrand a créé en son temps le Comité national consultatif d'éthique pour les questions médicales. S'y côtoient médecins, scientifiques, responsables religieux, philosophes, élus, citoyens. Ce comité qui n'a aucun pouvoir précis a acquis cependant une influence énorme. Aucune décision ne peut être prise dans le domaine de l'évolution des techniques médicales sans son avis. Pourquoi ne pas créer tout simplement un comité national consultatif sur les problèmes énergétiques ? Car le nucléaire n'est pas le seul à poser des problèmes, comme nous l'avons évoqué. Ce comité, composé de scientifiques – et pas seulement ceux du CEA –, de philosophes, de sociologues, d'élus (et à ce sujet, le comité d'évaluation des choix technologiques du Parlement devrait y être étroitement associé), mais aussi des représentants des maires de petites villes ou villages et de simples citoyens. Ce comité bien évidemment aurait accès à des visites des centrales aussi bien que des sites de stockage des parcs d'éoliennes et pourrait donc s'avérer une sorte de caution morale.

Présidé par un scientifique de renom connu pour son intégrité et son indépendance, comme ce fut le cas avec Jean Bernard pour le Comité national

consultatif d'éthique, ce comité pourrait jouer un rôle d'apaisement, car c'est sur le terrain de l'information que se joueront l'avenir de la politique de l'énergie et donc notre avenir. L'Europe ne doit pas être le continent de la peur, le continent de l'antiprogès et finalement, sous de faux prétextes, celui de l'antiscience. Et puis, décision plus facile à prendre en France, il faut couper les liens entre le nucléaire militaire et le nucléaire civil. Cela a été fait dans de nombreux pays, notamment l'Amérique, et cela éviterait bien des amalgames.

Car je réponds à votre question de la première page, non, il n'y a pas de raison d'avoir peur du nucléaire pacifique, il faut simplement bien le contrôler !

1- Rappelons : téra  $10^{12}$ , giga  $10^9$ , méga  $10^6$ , kilo  $10^3$ .

2- Claude Allègre avec Dominique de Montvalon, *L'Imposture climatique*, Plon, 2010.

3- J. L. Butré, *L'Imposture. Pourquoi l'éolien est un danger pour la France*, éditions du Toucan, 2008.

## **Bibliographie sommaire (mais solide !)**

- R. Bimbot, *Histoire de la radioactivité, l'évolution d'un concept et de ses applications*, Vuibert/Adapt, 2006.
- G. Charpak et R. L. Garwin, *Feux follets et champignons nucléaires*, Odile Jacob, 2000.
- G. Charpak, R. L. Garwin, V. Journé, *De Tchnernobyl en Tchernobyls*, Odile Jacob, 2005.
- R. Dautray, *Quelles énergies pour demain ?*, Odile Jacob, 2004.
- J. P. Poirier, *La Terre, mère ou marâtre ?*, Flammarion, 1998.
- E. Segrè, *Les Physiciens modernes et leurs découvertes : des rayons X aux quarks*, Fayard, 1984.
- E. Segrè, *Les Physiciens classiques et leurs découvertes : de la chute des corps aux ondes hertziennes*, Fayard, 1987.